

상주영천고속도로 6공구 절토사면(STA.10+260~10+460
상주방향) 붕괴원인 분석 및 사면안정 검토 보고서

2018. 5.

(주) 다 산 이 엔 지
DASAN ENGINEERING CO., LTD.

제 출 문

지에스건설(주) 귀중

귀사에서 의뢰한『상주영천고속도로6공구 절토사면(STA.10+260~10+460, 상주
방향) 붕괴원인 분석 및 사면안정해석 용역』에 대한 과업을 수행하고 그 성과
를 본 보고서로 정리하여 제출합니다.

2 0 1 8 년 5 월

서울특별시 관악구 관악로 37길 56

주식회사 다산이엔지

대표이사 주재건 (인)

책임기술사 (토질 및 기초) 조 성 하 (인)



목 차

1. 과업 개요	1
1.1 공사명	1
1.2 현장 위치	1
1.3 과업 목적과 범위	1
1.4 업무수행 개요	1
2. 사면활동 발생	3
2.1 사면활동 발생 개요	3
2.2 대상지역 지질 특성과 암반사면 활동 사례	5
2.3 대상지역 시공 중 사면 활동 대응 내용	7
2.4 사면 안정성 검토 내용 분석 및 원인분석에 대한 시사점	13
3. 원인 분석과 대책 수립을 위한 추가 조사	14
3.1 조사 내용 및 방법	14
3.2 기존 조사자료 분석	16
3.3 추가 지반조사자료 분석	18
3.4 붕괴 원인과 대책공법 수립을 위한 지반조사자료 성과분석	23
4. 활동 원인 분석과 대책 수립	25
4.1 퇴적암 사면의 예상 활동면 분석	25
4.2 강수와 포항지진과의 연관성 분석	30
4.3 계측자료 분석	37
4.4 준공 후 보강대책 적용(2017. 12)의 적절성 분석	40
4.5 장기 안정성 확보를 위한 대책 수립	47
4.6 장기 안정성 대책 적용 안정성 분석	49

5. 추가 활동 분석과 대책 수립	52
5.1 추가 활동 관찰내용	52
5.2 계측결과 분석	55
5.3 대안 분석	58
5.4 장기 안정성 확보 방안	59
6. 결론 및 추천사항	60

표 목 차

표 2.1 기존사례 적용된 강도정수	13
표 3.1 추가 지반조사 항목과 수량	15
표 3.2 실시설계 지반조사 절리면 전단시험 결과	16
표 3.3 지표지질 조사에 의한 절리면(층리면) 분석내용	18
표 3.4 시추공 영상촬영 구간과 심도	22
표 3.5 추가 지반조사시 획득된 지반물성치	24
표 3.6 기존 안정성 검토시와 추가 지반조사시 산정한 지반물성치	24
표 4.1 퇴적암으로 이루어진 사면의 붕괴유형별 특징	26
표 4.2 지질 이상대 위치 및 방향성을 고려한 예상 파괴 포락선	27
표 4.3 하중계 계측 자료	39
표 4.4 깎기 비탈면의 검토 대상구간 선정 조건	41
표 4.5 해석 적용 지반 정수	44
표 4.6 깎기 비탈면의 검토 적용 안전율	45
표 4.7 깎기 비탈면의 기준 안전율	49
표 5.1 하중계 계측 자료(2018년 4월)	57
표 5.2 사면 장기안정성 확보 방안	59

그 림 목 차

그림 1.1 상주영천고속도로 제6공구 노선도	2
그림 2.1 2017년 11월 15일 포항지진(기상청 보도자료)	3
그림 2.2 사면활동 발생 현황	4
그림 2.3 사면활동 발생 양상	4
그림 2.4 과업구간 산계	5
그림 2.5 과업구간 수계	5
그림 2.6 1:100만 지질도	5
그림 2.7 1:25만 지질도	5
그림 2.8 1:5만 지질도	5
그림 2.9 지질계통도	5
그림 2.10 중앙고속도로 퇴적암반 사면 활동 사례	6
그림 2.11 대구지하철 2호선 암반 사면 활동 사례	6
그림 2.12 절토부 옹벽 구간 탈락 발생	7
그림 2.13 공법 변경 전개도	7
그림 2.14 탄층 규모와 한계평형해석	8
그림 2.15 사면내 탄층 분포 현황	8
그림 2.16 2016. 12 절토사면 공사 현황	9
그림 2.17 사면 보강공법 적용 내용	9
그림 2.18 사면 계측 현황	10
그림 2.19 STA.10+300 사면 거동 현황(보강 후)	11
그림 2.20 STA.10+360 사면 거동 현황(보강 후)	12
그림 3.1 시추조사 계획수립을 위한 사면활동 관찰내용	14
그림 3.2 현장답사 후 시추위치 선정	15
그림 3.3 예상파괴면을 고려한 시추심도 결정	15
그림 3.4 기존 실시설계 시추 위치와 종단면도	16
그림 3.5 NBH-3 시료사진(탄층분포 확인)	17
그림 3.6 진행성 인장균열 발생 현황	17
그림 3.7 비탈면 인장균열과 소단배수구 단차 발생	18
그림 3.8 추가 시추조사 시추코어 상태	20
그림 3.9 추가 시추조사 시추 횡단면 상태	21
그림 3.10 시추공 영상촬영 위치	22

그 림 목 차

그림 3.11 실내시험을 위한 충전 점토	23
그림 4.1 추가 지반조사와 현장 손상 내용을 종합한 예상활동선	29
그림 4.2 추가 지반조사와 현장 손상 내용을 종합한 예상활동 방향	29
그림 4.3 영천지역 2017년 7월 기상자료(기상청)	30
그림 4.4 영천지역 2017년 8월 기상자료(기상청)	31
그림 4.5 영천지역 2017년 9월 기상자료(기상청)	32
그림 4.6 영천지역 2017년 10월 기상자료(기상청)	33
그림 4.7 영천지역 2017년 11월 기상자료(기상청)	34
그림 4.8 국내 지진 특성	35
그림 4.9 사면 내진 해석 결과	36
그림 4.10 사면내 광파 타겟 계측 현황	37
그림 4.11 사면내 하중계 계측 현황	38
그림 4.12 사면 보강 조치 내용	40
그림 4.13 붕괴발생에 대한 사면안정 해석단면 선정(STA.10+340)	41
그림 4.14 Plot of factor m_{α} against inclination of base of slice α	43
그림 4.15 Bishop's simplified method of slices (From Bishop, 1955)	44
그림 4.16 STA.10+340 기존보강 시 해석결과(건기시)	45
그림 4.17 STA.10+340 긴급보강 시 해석결과(건기시)	46
그림 4.18 장기안정성 확보를 위한 추가보강 방안	48
그림 4.19 STA.10+340 앵커 추가보강 시 해석결과(건기시)	48
그림 4.20 장기안정성 검토단면(우기시, 인장균열 수압작용 조건)	50
그림 4.19 STA.10+340 인장균열 수압 작용 여부에 따른 해석결과	51
그림 4.20 STA.10+340 장기안정 해석결과(우기시)	51
그림 5.1 절토부 앵커 추가파손 현황(2018년 4월)	52
그림 5.2 절토부 옹벽 상부콘크리트 상태(2018년 4월)	52
그림 5.3 사면 인장균열 발생 현황(2018년 4월)	53
그림 5.4 사면내 광파 타겟 계측 현황(2018년 4월)	54
그림 5.5 사면내 하중계 계측 현황(2018년 4월)	56
그림 5.6 절토부 옹벽구간 앵커 추가재시공 방안	58

1. 과업 개요

1.1 공사명

상주~영천 고속도로 민간투자사업 건설공사 6공구

1.2 현장위치

경상북도 군위군 효령면 거매리-부계면 창평리 일원

1.3 과업 목적과 범위

상주영천고속도로는 낙동 JCT에서 영천 JCT까지 연결되는 총연장 94km, 4차로 민간투자 고속도로로서 2017년 6월 28일에 개통되었다. 이 중 6공구는 경상북도 군위군 효령면 거매리와 부계면 창평리를 잇는 연장 11.340km에 해당된다(그림 1.1).

본 과업은 6공구 구간 중 STA.10+260~10+460 상주방향에서 2017년 11월에 관찰된 사면 상부 균열, 옹벽 어스앵커부의 파손 등의 사면활동 현상에 대한 원인과 2017년 12월에 실시된 보강공사의 적합성을 판단하는데 주목적이 있다. 아울러 향후 안정을 유지하기 위한 대책과 유지관리 방법에 대해서 지반조사 결과를 토대로 제시하고자 한다. 구체적인 과업 범위는 다음과 같다.

- ① STA.10+260~10+460(상주방향) 사면파괴 원인 분석 및 상태평가
- ② STA.10+260~10+460(상주방향) 구간의 긴급보강에 대한 사면안정해석 및 상태평가
- ③ STA.10+260~10+460(상주방향) 구간의 영구보강 공법 제시
(구간별 보강공법에 대한 대표 횡단면도 작성포함)
- ④ 필요시 파괴 원인 및 대책에 대한 발주처 등의 질의에 대한 관련 성과물 설명

1.4 업무수행 개요

상기 과업을 수행하기 위해 다음과 같은 순서에 의거 검토를 수행한다.

- 실시설계와 및 지반조사 보고서 내용 분석
- 시공 중, 준공 후 사면 거동 자료 분석과 지반공학적 배경 파악
- 추가 지반조사 결과 분석 및 활동 원인 분석
- 최종 보강 후 사면안정 상태 평가와 사면안정 해석(필요시)
- 장기 안정성 확보를 위한 대책 제안과 사면안정 해석



그림 1.1 상주영천고속도로 제6공구 노선도

2. 사면활동 발생

2.1 사면활동 발생 개요

2017년 11월 15일 오후 2시 22분 32초에 포항시 북구 북쪽 7km 지역에서 규모 2.2의 지진이 발생하였다. 이어 22분 44초에 규모 2.6의 지진이 연속되었고, 규모 5.4의 본진이 29분 31초에 발생하였다. 본진 이후에도 총 70여회의 여진이 계속되었으며 규모 3.0 이상의 지진은 총 6회로 기록되었다.

포항지진 후 사면을 점검하는 중에 앵커부 파손 및 슛크리트부에 균열이 확인되어, 광파 계측 실시한 결과 준공 직후(2017년 7월28일) 측정한 값보다 수평변위가 3~45mm가 증가한 것으로 나타났다. 또한 PPP옹벽 전체 앵커부에 대한 현장 점검 결과, 앵커 22개소가 파손된 것으로 확인되었고, 옹지외 구간인 사면 상부에 길이 30m정도로 균열이 발생된 것도 현장 조사를 통해 추가 확인되었다(그림2.2, 2.3 참조). 이러한 조사결과를 토대로 2017년 12월 7일에 GS건설 기술본부가 제시한 응급복구 대책을 현장에 적용하여, 앵커 파손부를 중심으로 절토부옹벽에 55개소, 계단식옹벽부에 27개소의 앵커를 추가로 시공하였고, 균열부에는 시멘트 밀크 그라우팅으로 충전하였다. 사면에 부착된 광파 반사판으로 변위 상태를 파악하였고, 보강 앵커에 설치된 로드셀로 반력상태를 주기적으로 측정하였다. 이와 같은 현상이 관찰됨에 따라 전문가 현장 점검을 진행하였고, 추가 지반조사를 계획하여 활동 규모, 암반 불연속면 상황, 거동분석 업무를 계획하였다.

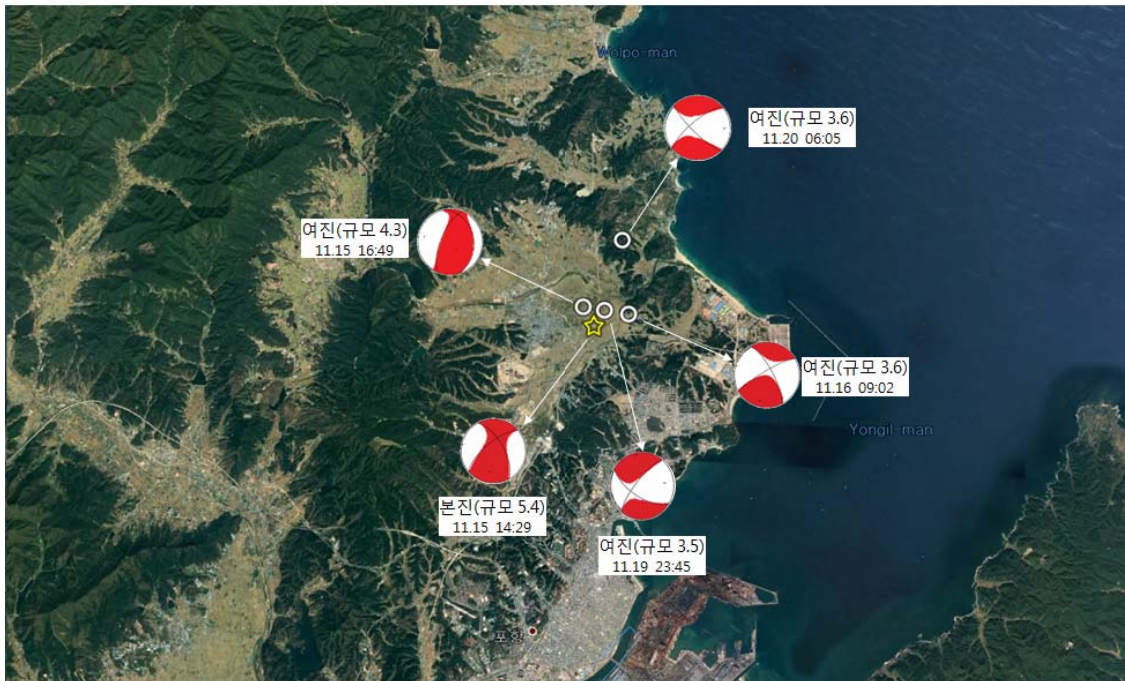


그림 2.1 2017년 11월 15일 포항지진(기상청 보도자료)

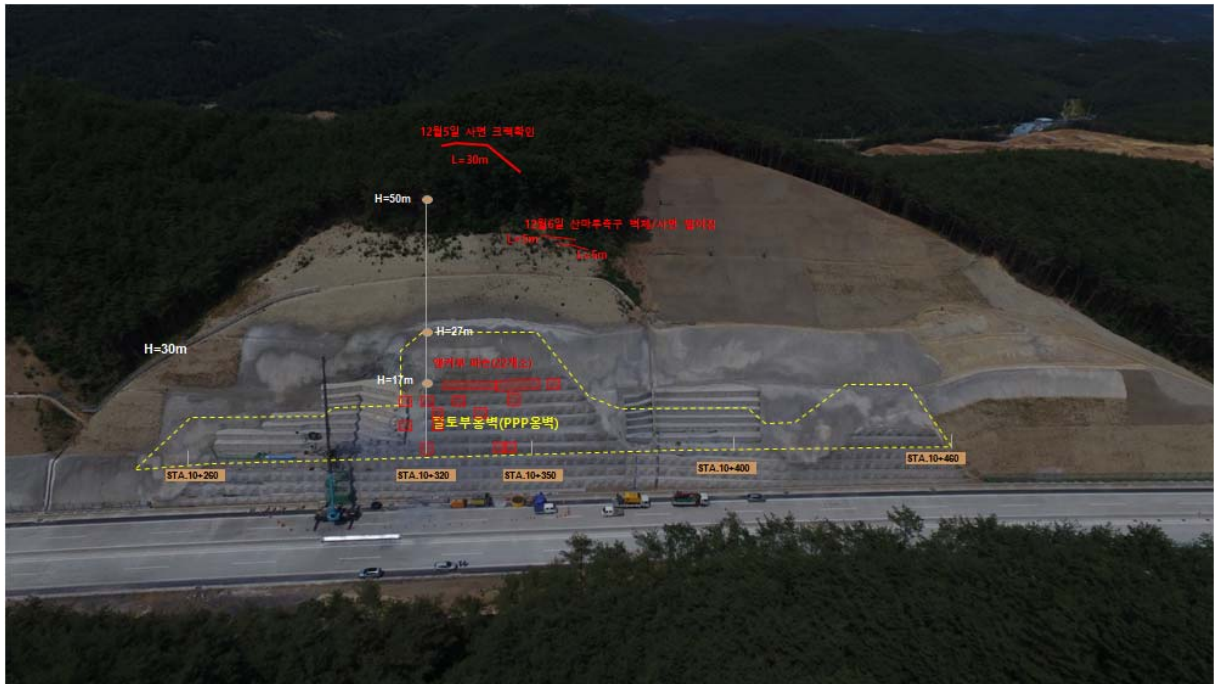


그림 2.2 사면활동 발생 현황

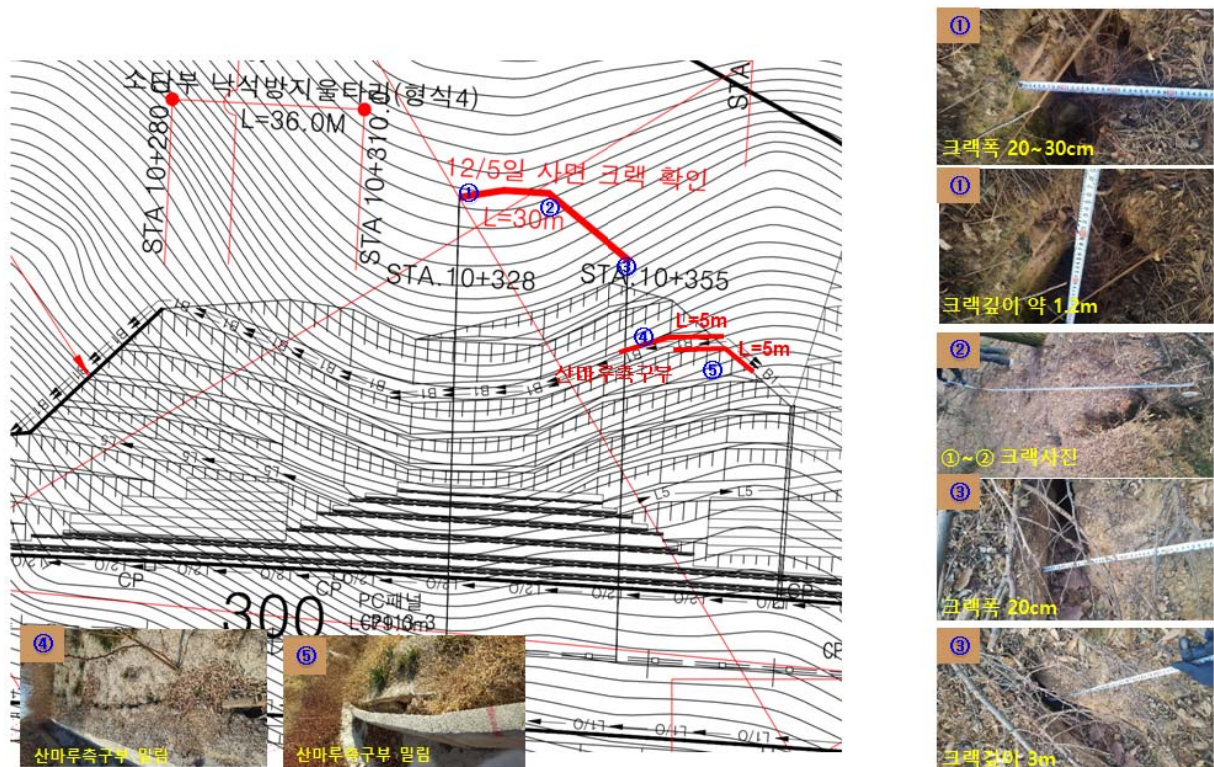


그림 2.3 사면활동 발생 양상

2.2 대상지역 지질 특성과 암반사면 활동 사례

사면활동이 발생한 상주영천고속도로 6공구의 산계는 팔공산 주봉을 중심으로 동남방향의 주산맥이 가로로 놓여있어 지형을 지배하는 배경이 된다. 1:100만 지질도 상에서 해당지역은 육성 퇴적기원의 경상누층군에 속하며, 1:25만 지질도 상에서 확대해 보면 잡색각력암층을 기준으로 구미동층원으로 구분된다. 또한 1:5만 지질도에서 기반암은 낙동군층군 일직층과 신라층군 후평동층으로 구성되며 셰일과 사암이 우세하게 분포하는 것으로 나타났다.

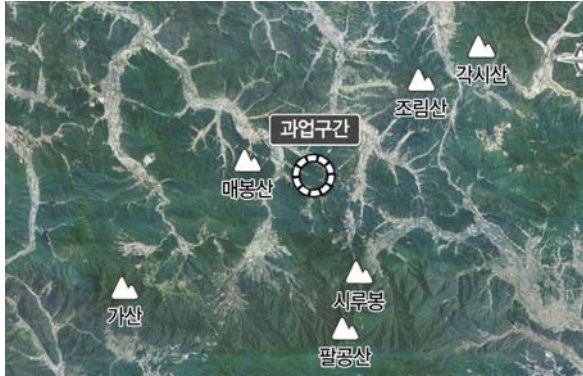


그림 2.4 과업구간 산계



그림 2.5 과업구간 수계

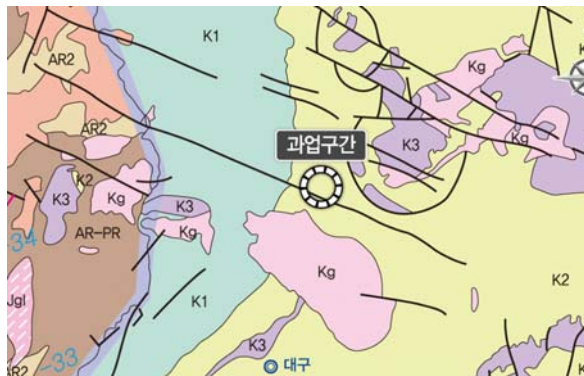


그림 2.6 1:100만 지질도



그림 2.7 1:25만 지질도



그림 2.8 1:5만 지질도



그림 2.9 지질계통도

사암과 셰일이 교호하는 지질조건에서는 층리면을 따라 탄질화된 셰일층이 협재되는 사례가 많이 보고되었다. 협재된 층간물질은 주로 점토 및 미고결층으로 이루어져 대기 중 노출

시 급속히 풍화가 진전되고 지하수가 용출되는 통로가 되어 사면활동에 원인을 제공하기도 한다. 퇴적암을 기반암으로 하는 지역에서는 층리면이 사면방향으로 경사가 형성된 경우에 사면이 절취된 후에 활동이 발생하는 사례가 일부 보고되고 있다. 암반사면 굴착 초기에는 양호한 암반으로 안정된 상태를 유지하다가 풍화변질이 진행되어 암반의 내구성이 저하되므로 불안정성이 증가하게 된다.

중앙고속도로 건설공사 시 대구시 북구 읍내동에 위치한 암반사면이 공사 중 경사가 18°로 형성된(그림 2.10) 층리면을 따라 파괴의 징후가 발견되어 활동암괴 150m×400m를 완전히 제거하여 안정을 확보한 바 있다. 조사된 바에 따르면 층리면에 협재된 점토층의 점착력이 0.8 t/m², 내부마찰각이 15°에 불과하였다.¹⁾

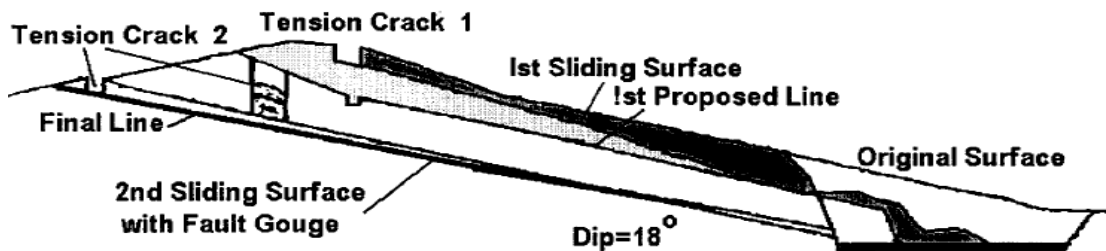


그림 2.10 중앙고속도로 퇴적암반 사면 활동 사례

달성군 다사읍에서 대구 지하철 2호선 건설공사 당시 암괴가 활동 파괴되어 암괴를 제거하여 사면을 안정화시킨 사례가 있다. 이 지역은 하양층군 칠곡층에 속하며 암종은 적색계통의 셰일과 사암이 교호한다. 층리면의 경사는 23°로 조사되었으며 발파작업 시 진동에 의해 층리면이 활동되었다.

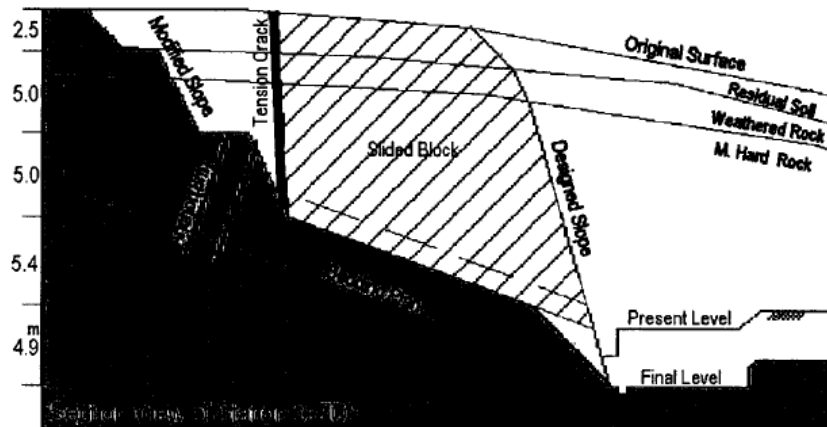


그림 2.11 대구지하철 2호선 암반 사면 활동 사례

1) 김성환, 유병옥, 1995 중앙고속도로 제1공구 STA.7+260~480구간(상) 전면부 옹벽설치방안 검토보고서

2.3 대상지역 시공 중 사면 활동 대응 내용

1) 절토부 옹벽 보강재 변경 및 옹벽 추가 설치(2016. 9)

사면활동이 최초로 관찰된 것은 2016년 9월 실정보고 내용에서 확인할 수 있다. 원 설계에서 적용된 소일네일 보강 절토부 옹벽이 설치 중인 STA.10+310~10+350 구간에서 토공 작업 중 탄층이 출현하여 절토부 옹벽이 탈락하였다. 탄층의 규모를 확인하기 위해 2016년 5월에 수평시추조사를 실시하였는데, 모래질 실트로 구성된 탄층이 심도 9m(6~15m구간) 정도로 분포하고 있음을 확인하였다.

네일링 길이가 6~10m 정도이므로 탄층 내부에 시공되어 탄층 외부에서의 활동에 저항할 수 없으므로 탄층 후방에 정착부를 형성시키고 초기 긴장력을 가할 수 있는 영구앵커로 변경하였다. 또한 보강구역은 탄층의 활동으로 야기된 인장 균열이 발생한 구간까지 확장하였다.

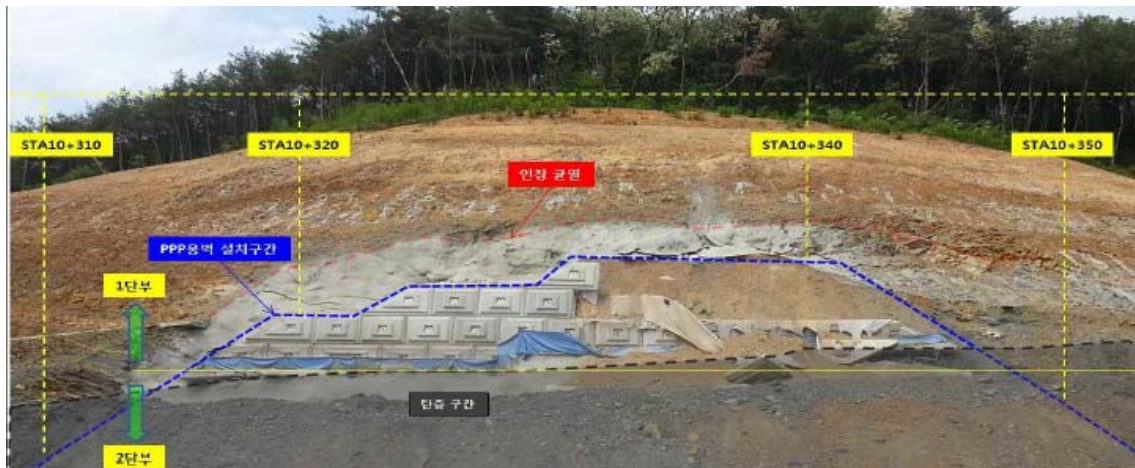


그림 2.12 절토부 옹벽 구간 탈락 발생

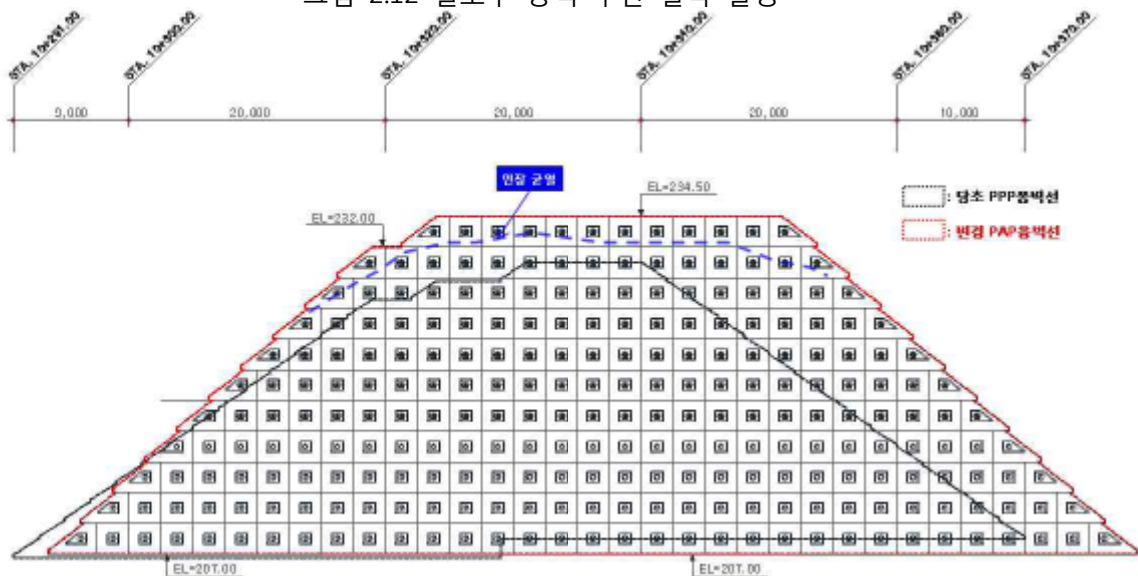


그림 2.13 공법 변경 전개도

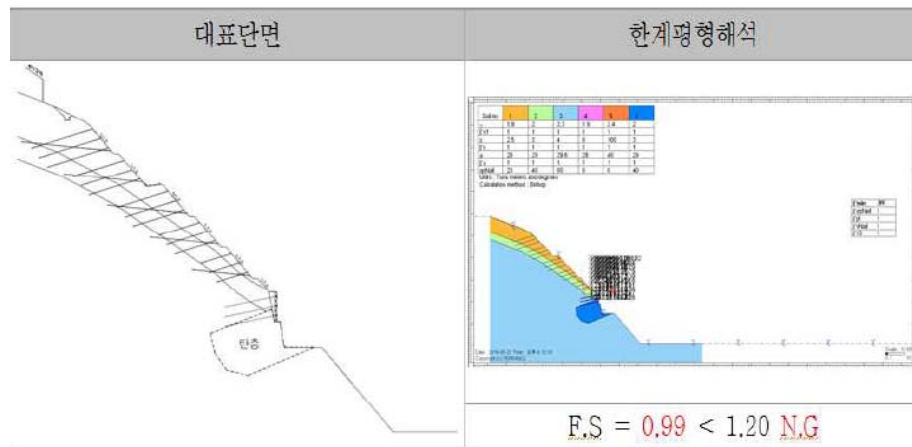


그림 2.14 탄층 규모와 한계평형해석

사면안정성을 검토하기 위해서 수평시추조사한 결과를 토대로 탄층의 존재 규모를 정의하고 한계평형 해석법을 적용하였다. 역해석을 통해 탄층구간의 점착력을 2.0t/m^2 으로 적용하였고, 영구앵커로 보강된 단면의 안전율은 1.34로서 최소안전율 1.2를 상회하는 것으로 분석하였다.

2) 절토사면(탄층 붕괴 구간) 보호·보강 공법 반영(2016. 12)

절토사면 중 STA.10+140~10+580(상주) 구간에서 광범위에 걸쳐 탄층이 출현하여 사면 붕괴가 발생하였으므로 실정보고를 통해 설계 변경이 이루어졌다. 전문설계업체의 지표지질 조사 결과²⁾ 시점부에서 종점부쪽으로 탄질층(Coal Bed)이 우상향으로 출현하는 것으로 조사되었다. 비탈면의 모양은 세일과 이암이 반복적으로 나타나며 층리면은 비탈면과 유사한 방향으로 30° 내외의 경사를 가지고 있었다.



그림 2.15 사면내 탄층 분포 현황

2) 상주~영천간 민자고속도로 건설공사 6공구 비탈면(꺾기 7,8 구간) 안정성 검토 보고서(대한건설ENG 2016. 11)

2016년 9월에 실정보고된 구간 좌우측으로 탄질층이 안정을 확보할 수 없는 조건으로 판단되어 구간별로 보강공법을 적용하였다.

- ① 소일네일 보강과 슛크리트 타설
- ② 소일네일로 지지되는 계단식 옹벽과 슛크리트 타설
- ③ 높이가 30m 이상인 구간(STA.10+380~10+480)은 당초 1:1경사에서 1:1.8 경사로 완화



그림 2.16 2016. 12 절토사면 공사 현황

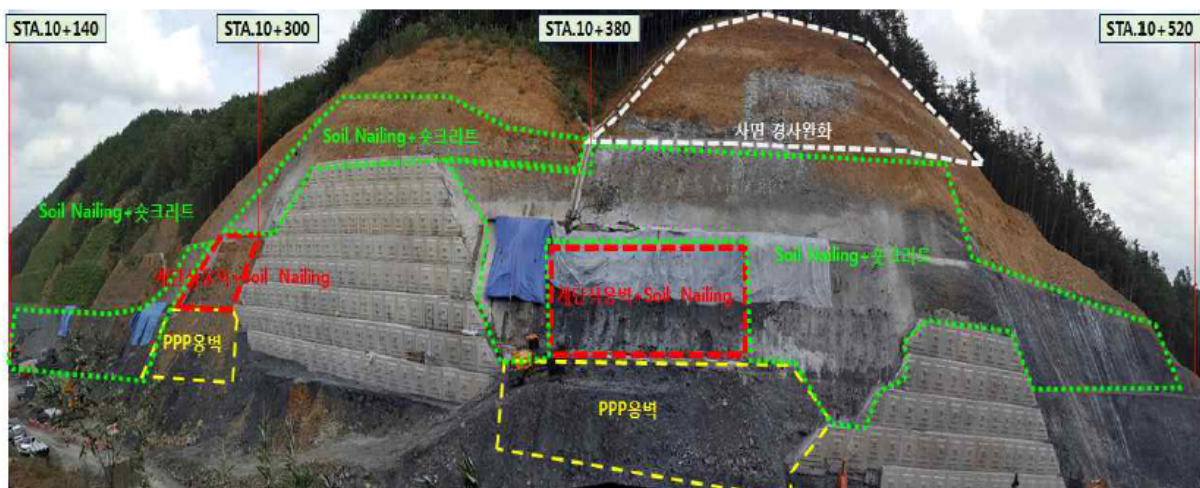


그림 2.17 사면 보강공법 적용 내용

보강공법을 적용할 때 안정성 평가는 한계평형 해석법에 의거하여 수행되었으며, 사면 붕괴를 야기했던 탄층의 경우 시공 시 노두에 노출 및 확인 천공을 통해 탄층 깊이 및 폭을 반영하여 안전율을 검토하였다. 이때 탄질층의 지반물성치는 2016년 9월에 실정보고 내용에서 역해석을 통해 검토된 값을(점착력 2.0t/m², 내부 마찰각 29°)사용하였다.

3) 절토사면 보강 공법 적용 후 사면 거동

탄질층에 의해 사면이 불안정해짐에 따라 깎기 7, 8구간을 대상으로 소일네일 보강과 슛크리트 타설, 소일네일로 지지되는 계단식 옹벽과 슛크리트 타설, 높이가 30m 이상인 구간(STA.10+380~10+480)은 당초 1:1경사에서 1:1.8 경사로 완화와 같은 보강조치가 시행되었다. 보강 후 사면 거동을 분석하기 위해 다음 그림과 같이 경사계와 지하수위계를 설치하여 거동 자료를 축적하였다.

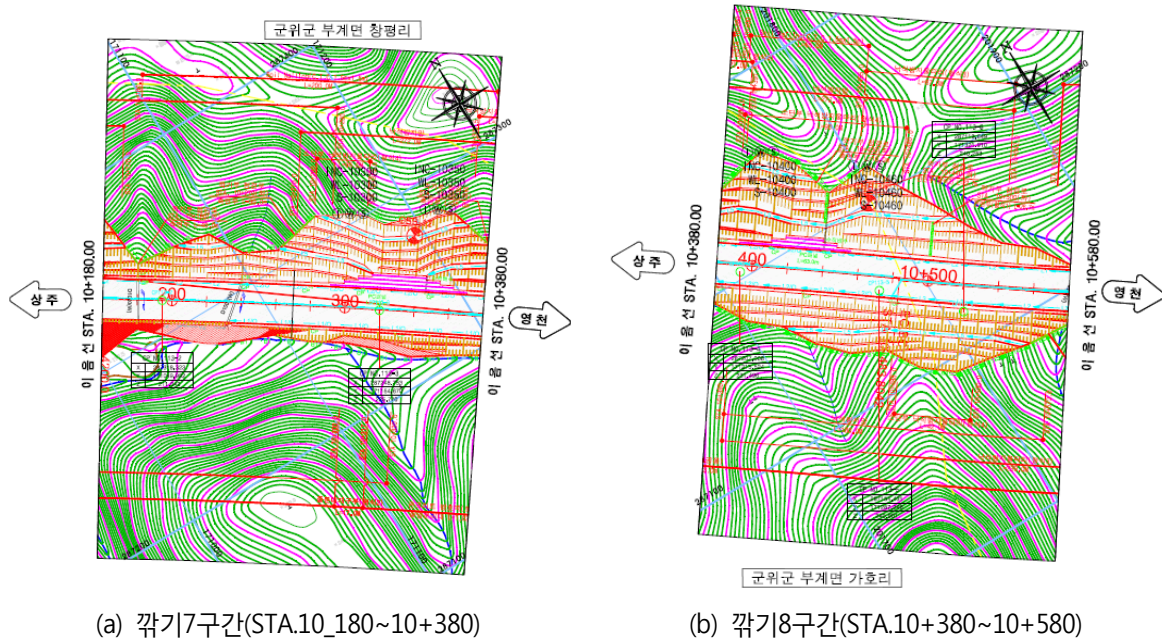


그림 2.18 사면 계측 현황

보강 공사 후 2016년 10월부터 준공 직전인 2017년 5월까지의 경사계자료를 살펴보면 설치지점 상부에서 최대 9~13mm정도의 수평변위를 보이며 만곡점이 다수 존재하는 것으로 보아 사면을 구성하는 지반이 심도에 따라 강도가 심도별로 상이함을 알 수 있다. 또한 STA.10+360과 같이 하부 고정점 직상부에서 사면측으로 수평변위가 발생하고 위는 배면측으로 거동을 보이는 것은 탄질층이 주로 분포하는 경사계 설치심도 GL(-)12.5~16.5m 부근으로 활동이 발생하였음을 지시한다. 한편 지하수위 변화의 경우 계측보고서 자료에 의하면 설치지점 하부에서 사면 절취공사에 따른 영향을 받지 않고 일정한 값을 유지하거나 소폭 감소하는 경향을 보인다.

전반적으로 지하수위 변화, 최대 수평변위량이나 거동 양상이 보강 이후 2017년 5월까지 크게 변화를 보이고 있지 않으므로 보강 후 거동은 매우 안정적인 상태를 보였던 것으로 판단되며, 탄질층을 대상으로 수행된 보강조치의 내용은 효과적으로 사면 거동을 억제하고 있었다고 보인다.

INCLINOMETER DISPLACEMENT REPORT

공 사 명 : 상주~영천간 고속도로 민간투자사업 건설공사(6공구)

관리번호 : INC-10300

설치심도 : 20.0m

설치위치 : STA.10+300 상주방향

설치일자 : 2016.02.03

초기치 측정 : 2016.03.06

(+)H0 : 상주방향

(-)V180



(+)V0 : 현장방향

(-)H180 : 영천방향

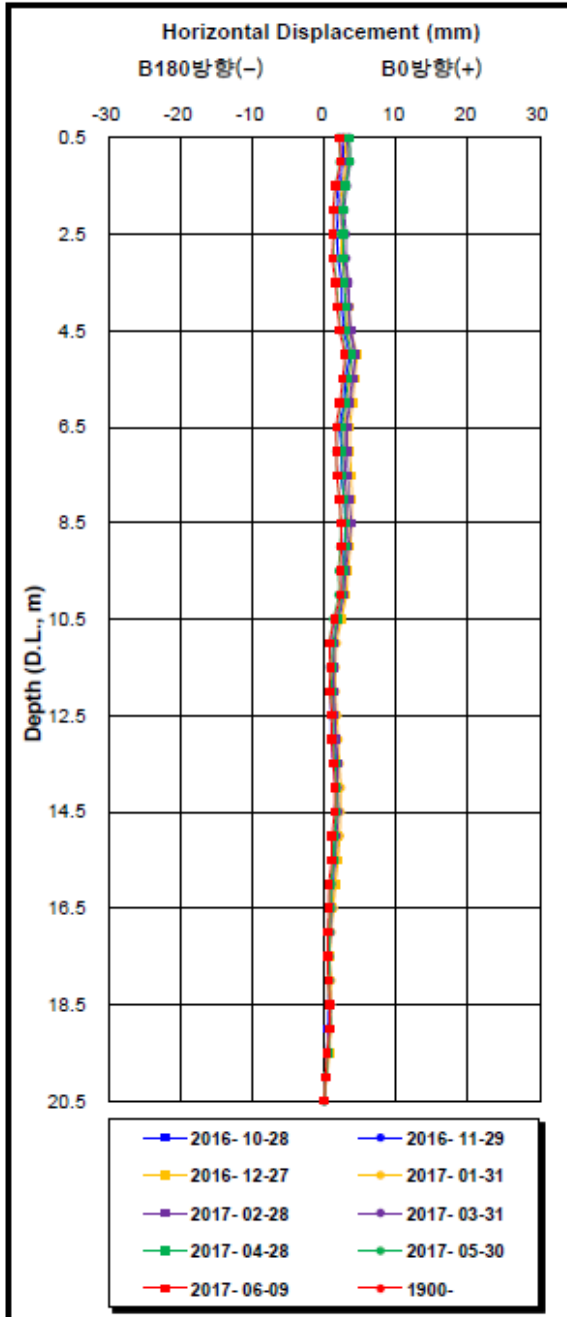
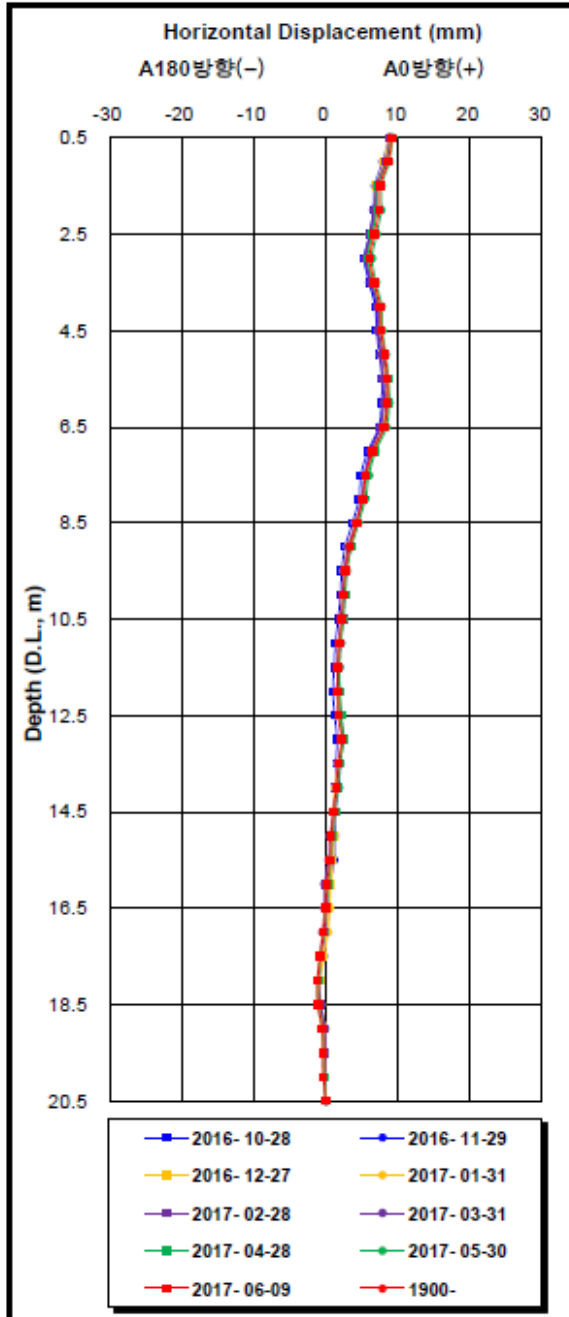


그림 2.19 STA.10+300 사면 거동 현황(보강 후)

INCLINOMETER DISPLACEMENT REPORT

공 사 명 : 상주~영천간 고속도로 민간투자사업 건설공사(6공구)

관리번호 : INC-10360

설치심도 : 20.0m

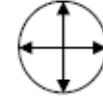
설치위치 : STA.10+360 상주방향

설치일자 : 2016.02.03

초기치 측정 : 2016.03.08

(+)H0 : 상주방향

(-)V180



(+)V0 : 현장방향

(-)H180 : 영천방향

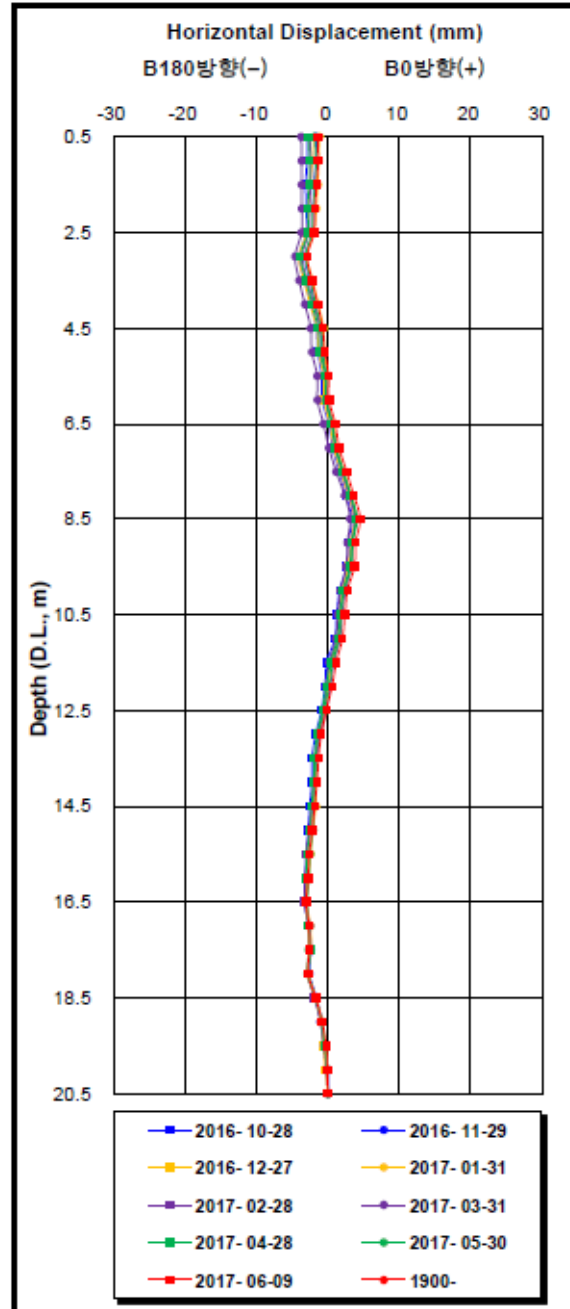
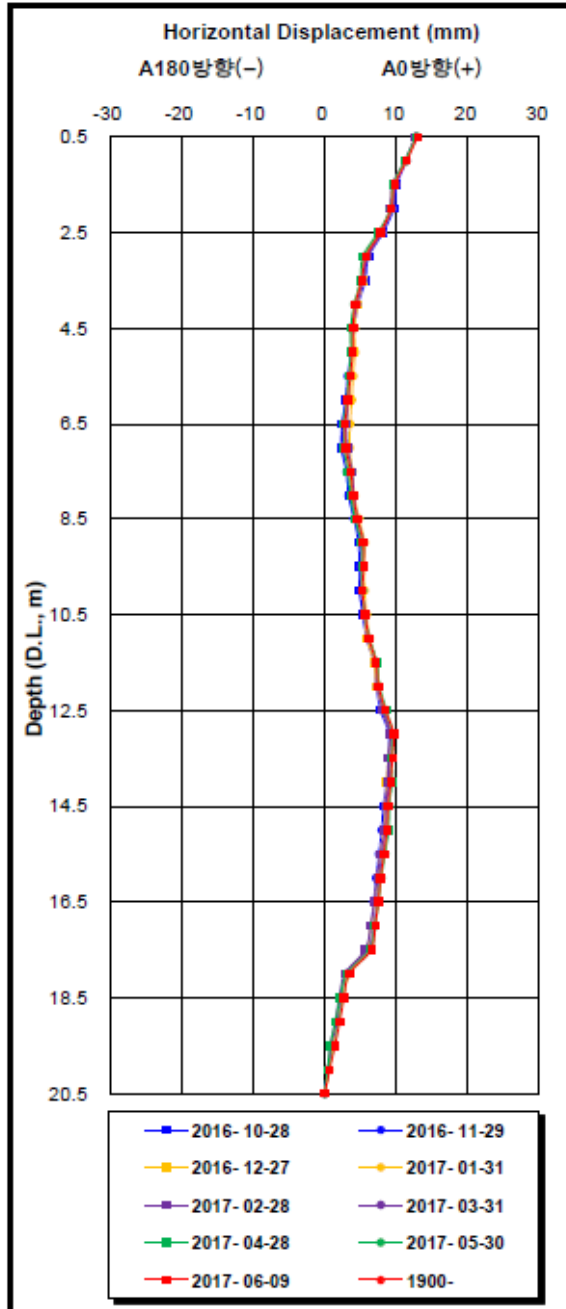


그림 2.20 STA.10+360 사면 거동 현황(보강 후)

2.4 사면 안정성 검토 내용 분석 및 원인분석에 대한 시사점

탄질층을 포함한 암반사면에서 안정성을 검토할 탄질층과 같이 토사화가 진행된 지반의 경우 한계평행해석에 의해 안전율을 산정한다. 이때 탄질층이 분포하는 범위가 명확해야하고, 암반이 굴착되었을 때 강도정수를 실제와 근사하게 추정하여야 한다. 앞서 시행한 사면안정 검토에서 탄질층의 범위는 시공시 노출된 탄질층의 폭 및 확인 천공을 통해 그 깊이를 추정된 자료를 근거로 탄층 범위를 적용하였고, 당초 파괴시 역해석을 통해 점착력 2.0t/m² (20kPa), 내부마찰각(29°) 등의 지반 물성치를 추정하였다.

시추조사시 탄질층의 불교란 시료를 획득하기 어려우므로 현장시험이나 교란 시료를 재생형하여 전단시험을 통해 확인하는 것이 합리적이거나, 현재 관련 시료채취가 곤란함에 따라 과거 타 현장에서 적용하여 안정을 확보한 경험을 참고하는 것이 바람직하다. 다음 표는 탄질 세일 파쇄대의 강도정수에 대한 문헌자료를 정리한 것이다. 탄질층을 포함한 사면의 전단강도 중 점착력은 1~50kPa, 내부마찰각은 10~28°정도로 적용하고 있음에 따라 금회 사면안정성 검토시에는 과거 적용된 지반물성치를 참고하여 조금 더 안정적인 측면에서 검토하는 것이 바람직하다고 판단된다. 이와 더불어 보다 엄밀한 시추 조사와 현장 및 실내시험을 통해 활동체의 규모와 활동면의 전단강도 특성을 파악할 필요가 있다.

표 2.1 기존사례 적용된 강도정수

구 분	단위중량(kN/m ³)	점착력(kPa)	내부마찰각(°)
탄질세일층 사면의 안정화 평가(배우석 외)	-	50	19
탄질세일파쇄대 비탈면 시공 (유치-이양간 지방도 4차선 확포장공사)	-	45	28
경상계퇴적암 비탈면 평면파괴 안정성	22.5	1	10
충전물을 포함한 불연속면(Barton)	-	11~13	10
상주-영덕 3공구	-	15	23
단양 붕괴절토사면 탄질세일(김승현, 2009)	-	16	25
상주영천 고속도로 6공구 실시설계 (사암/이질암 암반층)	24.0	20	32

3. 원인 분석과 대책 수립을 위한 추가 조사

3.1 조사 내용 및 방법

시공시 2회에 걸쳐서 보강공사가 수행된 검토 대상 절토사면에서 2017년 11월 27일에 사면 정상부 균열, 산마루 측구의 변형과 앵커부 파손이 2017년 11월 27일에 관찰되었다. 암반 절취시 발생한 활동 규모에 비해 대폭 증가한 양상이므로 활동 토체의 규모와 활동면에서 발휘되는 전단강도 특성을 파악하는 것이 매우 중요하다. 이를 위해 현재 준공된 사면을 대상으로 시추조사를 시행하여야 하므로 접근성이 확보될 수 있는 지형조건과 기존 보강앵커와의 간섭을 피할 수 있는 시추 가능위치 선정이 고려되어야 한다.



그림 3.1 시추조사 계획수립을 위한 사면활동 관찰내용

상부에 균열이 발생한 STA.10+340을 중심으로 균열면을 통과하는 경사시추 1개소와 활동 토체 내부에서 도로 계획고까지 연직 시추 2개소를 선정하였다. 이때 붕괴양상을 분석하여 예상되는 원호파괴와 층리면을 따라 발생할 수 있는 평면파괴 가능성을 모두 검토할 수 있도록 예상파괴면을 설정하여 이를 통과할 수 있는 시추심도를 결정하였다. 공내 영상촬영을 통해 불연속면과 탄층 분포상태를 직접 확인하고자 하였고, 기반암 내부에 토사가 충전되었거나 점토가 협재된 구간을 대상으로 직접전단시험을 수행하는 것으로 계획하였다.

검토대상 지역이 지질학적으로 변동이 심했던 지역임을 고려하여 지질도를 분석하고 인근 지역의 단층계를 분석하였다. 또한 2009년도에 수행된 실시설계시 지반조사 내용을 함께 파악하여 자료의 신뢰도를 높이고자 하였다. 신규로 수행된 지반조사 중 실내시험의 결과를 분석하여 활동을 야기한 지층의 공학적 특성을 엄밀하게 규명할 계획이다. 조사 항목과 수량을 종합하면 다음 표 3.1과 같다.

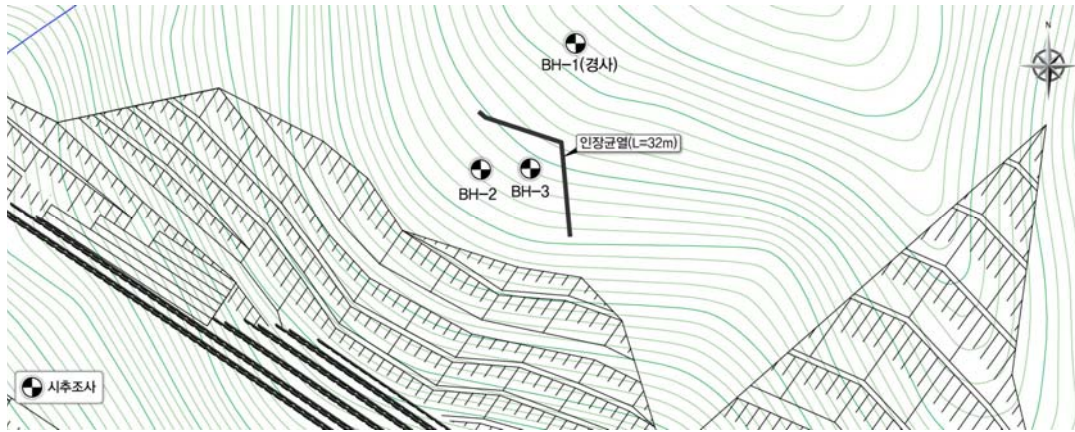


그림 3.2 현장답사 후 시추위치 선정

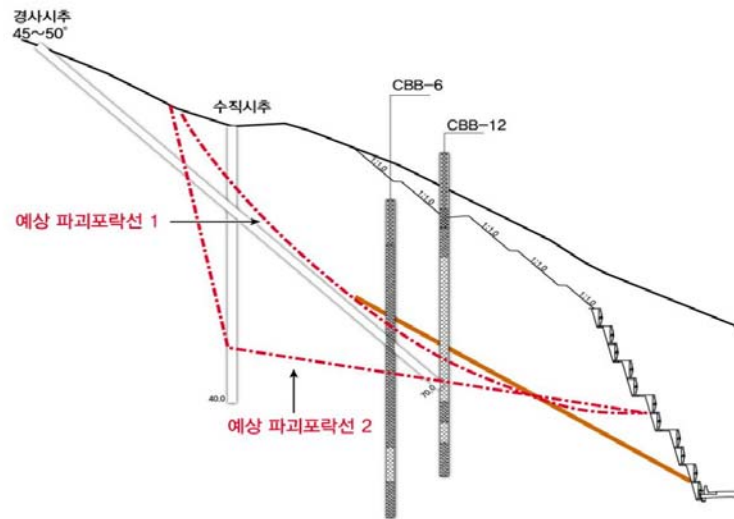


그림 3.3 예상파괴면을 고려한 시추심도 결정

표 3.1 추가 지반조사 항목과 수량

구 분			단 위	수 량	비 고
현장조사	시추조사	경사	공사	1	• 지층분포 특성
		수직	공사	2	• 지질 이상대 위치 및 수직/수평적 심도 파악
현장시험	표준관입시험		회	10	• 토사 및 풍화암의 상대밀도/연경도 파악
	시추공영상촬영(BIPS)		회	8	• 공내 육안분석, 불연속면 발달특성
실내시험	토사	기본물성시험	회	3	• 충전점토의 물리적 특성
		직접전단시험	회	3	• 충전점토의 전단강도 특성
	암석	일축압축강도	회	9	• 암석의 역학적 특성
		절리면전단시험	회	3	• 불연속면의 전단강도 특성
		박편분석	회	1	• 암석의 광물 분석 및 풍화와 균열특성을 파악

3.2 기존 조사자료 분석

1) 실시설계 조사자료 분석

고속국도 제301호선 상주~영천 고속도로 민간투자사업 실시설계 지반조사보고서 제6공구: 효령~부계(영천상주고속도로주식회사, 2009. 12)의 내용을 분석하였다. 각기구간의 시추조사 공번은 CBB-6, 12, 13으로서 절리면 전단시험을 통해 최대와 잔류 전단강도를 측정하였다. STA. 10+300~10+500 구간에서 시행된 수직 시추조사 3공에서 하부에 이상대(단층, 단열대) 집중 분포하는 것으로 나타났다. 기반암은 사암 및 이질암이고, 주불연속면의 방향은 J1:02/359, J2:75/104, J3:82/013으로 파악되었다. 탄층에 대한 분포상황은 파악되지 않았고 이에 대한 강도특성도 제시되지 않았다.

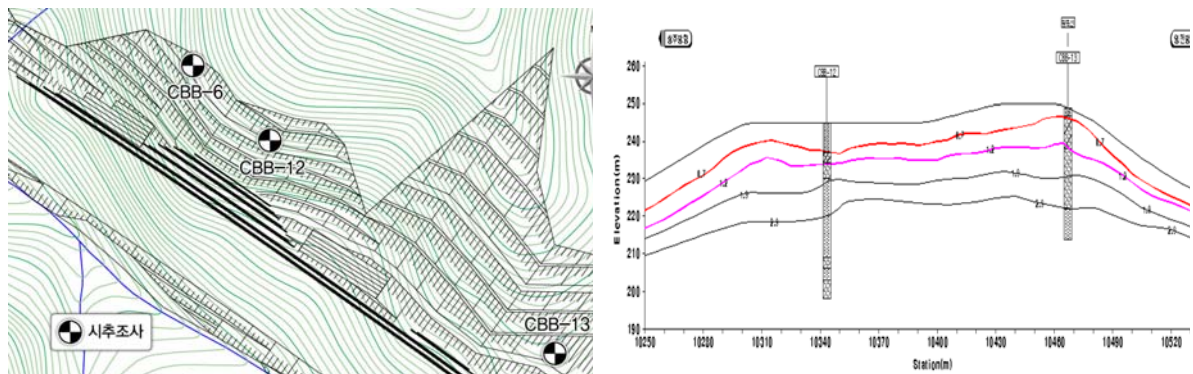


그림 3.4 기존 실시설계 시추 위치와 종단면도

표 3.2 실시설계 지반조사 절리면 전단시험 결과

구 분	공 번	점착력(kPa)		내부마찰각(°)	
		최대	잔류	최대	잔류
꺾 기 구 간	CBB-07	130	-	35.9	30.9
	CBB-10	180	-	36.1	29.6
	CBB-17	40	-	37.5	33.3

2) PPP 옹벽 사면안정해석 검토시 조사자료 분석

2016년 9월에 실정보고된 STA.10+291~10+370, 상주방향 단면 검토시 수행된 수평시추 조사 결과를 파악하였다. 탄층이 출현함으로써 암반 절취 중 붕괴가 발생한 구간으로서 탄층은 수평거리 6.0~15.0m 지점에서 모래질 실트층으로 나타났다. 역해석을 통해 전단강도를 추정하였으며, 탄층의 점착력은 30kPa 적용시(기존 적용 40kpa)사면의 안전율은 0.99로 산정되었으므로 안전을 고려하여 20kPa로 조정하였고, 내부 마찰각은 29°를 적용하여 안정성 검토가 수행되었다.



그림 3.5 NBH-3 시료사진(탄층분포 확인)

3) 비탈면(깎기 7, 8구간) 안정성 검토보고서(2016. 11) 자료 분석

깎기 7, 8 구간 중 STA.10+140~10+540 구간 비탈면에 현장조사가 수행되었다. 조사 당시 사면 규모는 상주방향(상행)으로 연장 400m, 비탈면 최대높이는 46.3m이고 사면 상부에 진행성 인장 균열이 발생한 것으로 나타났으며 이로 인해 소단 배수구에 단차가 발생하였다. 지표지질 조사 결과에서 3개조의 주된 절리(층리)가 분포하는 것으로 파악되었으며 연장성은 1~6m 정도로 관찰되었다. STA.10+380~10+480의 경우 절리면에 점토가 충전되었으며 사면을 따라 누수가 진행되고 있었다. 조사결과 탄층지반의 강도정수는 앞서 검토한 결과를 동일하게 적용하였다. 붕괴활동 양상은 절리간격이 좁고 파쇄가 심하며 탄층의 협재로 인해 원호활동과 유사한 형태로 분석하였다.

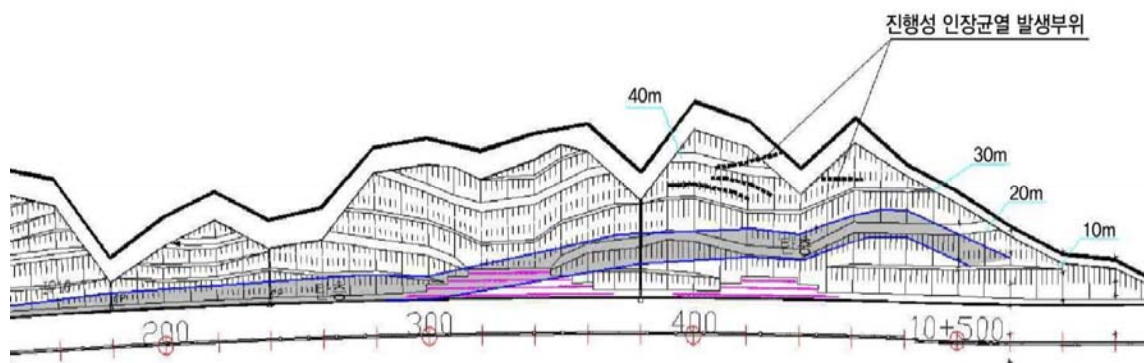


그림 3.6 진행성 인장균열 발생 현황



그림 3.7 비탈면 인장균열과 소단배수구 단차 발생

표 3.3 지표지질 조사에 의한 절리면(층리면) 분석내용

비탈면 위치	STA. 10+140~10+540(상행)		
연장 및 높이	L=400m, H=46.3m		
비탈면 방향 (dip/direction)	55/230		
절리면 방향	Joint 1	Joint 2	Joint 3
	240/30	193/80	290/85
절리간격(m)	0.2~0.3	0.1~0.4	0.5~1.0
절리연장성(m)	3~5	1~3	3~6
절리면거칠기	평활 또는 활면	평활 또는 활면	평활 또는 활면
절리틈새(mm)	2.0~5.0	2.0~10.0	1.0~5.0
절리충전물질	점토	점토	점토
누 수	습윤	습윤	습윤
비 고	• 봉락 내지 파괴의 형태는 불연속면(층리면)을 따라 발생하는 평면파괴의 형태이기 보다는 발달된 절리의 간격이 좁고 파쇄가 심한 암질과 탄층의 협재로 인하여 전반적으로 원호활동과 유사한 형태를 띠고 있음		

3.3 추가 지반조사자료 분석

경사시추 1공(BH-1)과 수직시추 2공(BH-2, 3)에 대해 코아채취, 영상촬영, 실내 및 현장 시험이 수행되었다. 자세한 내용은 지반조사 보고서를 참고하기로 하고, 본 절에서는 붕괴원인과 사면안정에 관련된 주요 사항을 요약하기로 한다.

1) 시추조사 자료 분석

경사시추(BH-1)은 지표로부터 70m, 수직시추(BH-2, 3)은 40m까지 수행한 결과 매립층, 풍화토, 풍화암, 연암과 경암의 순으로 층서를 이루고 있고, 연경암은 이질암 및 사암으로 파악되었다. BH-1의 경우 도 13.7~61.2m 구간에 파쇄대 및 국부적 차별풍화의 영향으로 암질 상태가 불량하며, 절리 또는 층리 등의 불연속면 주변부는 심한풍화 상태다. 특히 전 구간

에 걸쳐 1~20cm 두께의 점토 충전구간이 다수 관찰되며, 절리 및 파쇄대 내에 협재된 것으로 나타났다. BH-2는 4.2~13.6m 구간은 전반적으로 암질상태가 불량하며, 심도 10.0~13.6m 구간의 경우 시추조사 시 대부분의 코어가 유실되었다. 층리 및 절리 등의 불연속면 주변을 따라 풍화가 진행되어 변색 및 국부적 토사화가 진행중이며, 두께 2~6cm의 점토 충전구간 역시 차별풍화구간 내 분포한다.

BH-3의 경우 BH-1, 2 지점에서 나타나지 않은 시멘트 그라우팅 피복구간이 심도 4.8~7.0m 구간에서 확인되었다. 이는 당초 의도한 내부 균열부로서 활동면으로 추정되는 심도이며 인장균열과 BH-3 지점의 연결성 내포한다. 심도 11.0~13.0m 구간에 두께 1~2cm의 점토 충전구간이 집중 분포하고 있으며, 심도 24.0~40.0m 구간 내에서도 국부적 점토충전 및 코어 유실부가 나타난다. 다음 그림에서 각 시추공에서 확인된 지층상태와 사면 횡단상에 지층 분포를 나타냈다.

시추공내의 지하수위 측정은 수직으로 시추된 BH-2, 3에 대하여 시추종료 후 시추공 내에서 1차로 실시하였으며, 시추작업 완료 후 공내에 PVC Pipe를 매설하여 24시간 이상 경과한 뒤에 재측정하여 안정된 지하수위를 측정하고자 하였다. 조사지역 시추조사공의 안정 지하수위는 지표로부터 22.7~26.9m인 경암층에서 분포하는 것으로 나타났다.

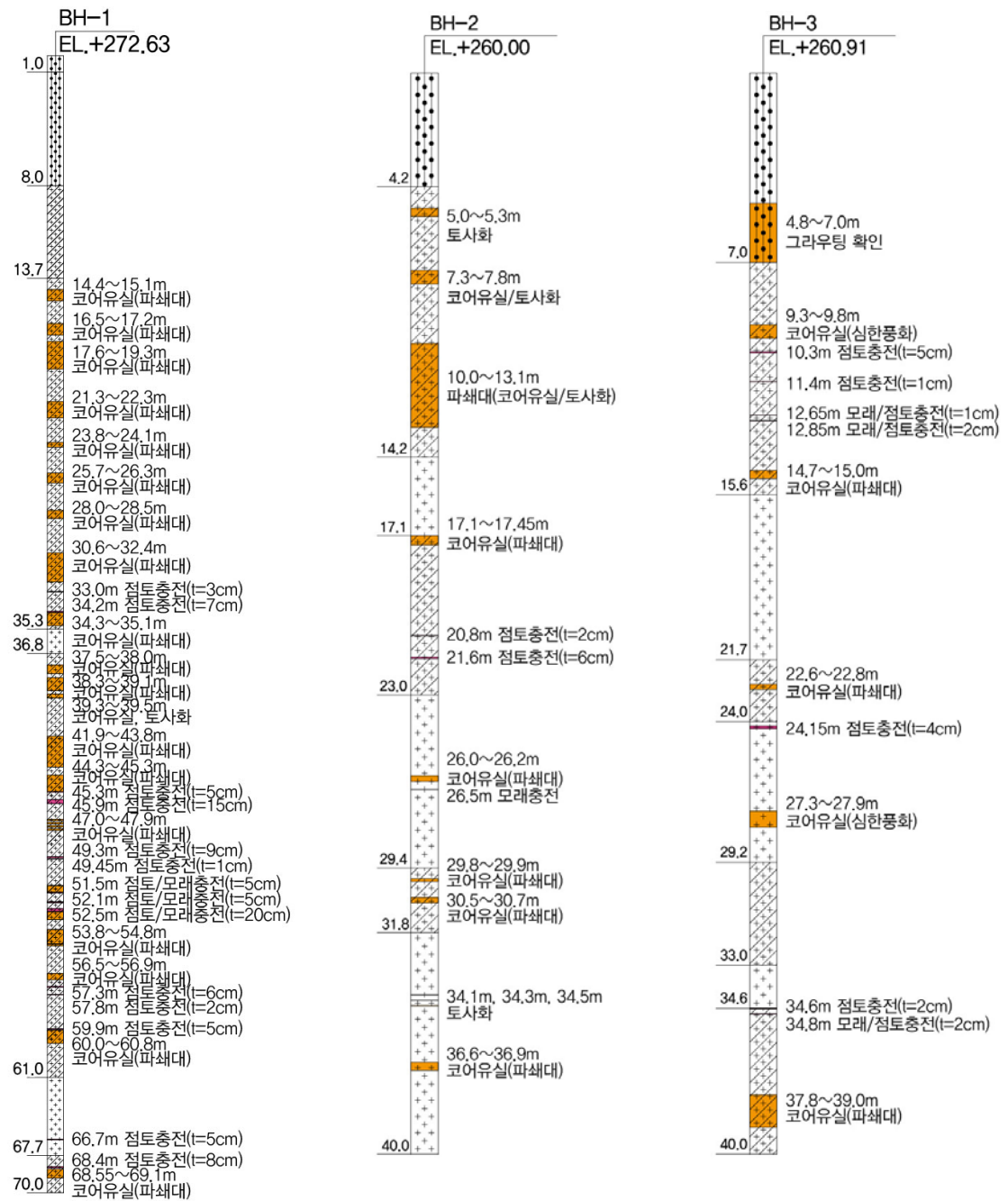
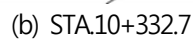
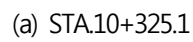


그림 3.8 추가 시추조사 시추코어 상태



21

2) 시추공 영상촬영

시추공 내 공벽 영상촬영을 통해 지표면 하부 암반층의 불연속면 분포상태, 균열폭, 충전물 등의 지반상태 및 단층대 특성자료 획득하고, 구간별 지표지질조사 결과와 상호 분석하고자 하였다. 시추공 3개소 내부의 사면부와 옹벽부 6개소를 조사하였다. 이때 파악할 수 있는 주요 현황은 절리면에 대한 경사방향, 간격, 충전물 두께 등이다. 자세한 결과는 지반조사보고서를 참고할 수 있다.

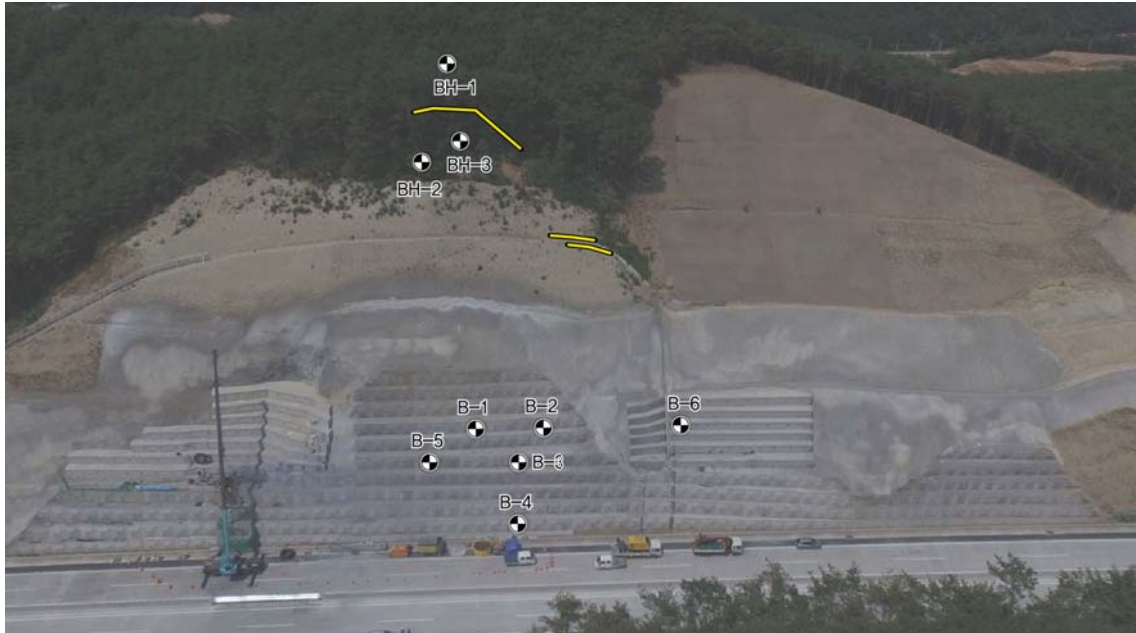


그림 3.10 시추공 영상촬영 위치

표 3.4 시추공 영상촬영 구간과 심도

구 분		촬영구간(GL-m)	촬영심도(m)	비 고
옹벽부	B-1	2.0~24.5	22.5	-
	B-2	2.0~28.5	26.5	-
	B-3	2.0~28.5	26.5	-
	B-4	2.0~27.0	25.0	-
	B-5	2.0~19.7	17.7	-
	B-6	2.0~30.0	17.7	-
사면부	BH-1	2.0~39.8	37.8	-
	BH-3	2.0~52.5	50.5	-

3) 실내 시험 결과

시추조사 시 채취된 코어 시료 중 코어내 다음 그림과 같이 충전된 점토를 선별하여 기본 물리적 특성과 직접전단시험을 통해 역학적 특성을 파악하고자 하였다. 교란된 시료의 한계는 있으나 사면이 노출될 때 활동을 야기시킬 수 있는 잔류강도의 특성을 보이므로 사면안정 해석시 중요한 자료로 활용될 수 있다. 층리면을 따라 협재된 점토 시료를 대상으로 직접전단시험을 실시한 결과 점착력은 7.3~11.9kPa, 내부마찰각은 23.9~26.2° 정도로 분석되었다.



그림 3.11 실내시험을 위한 충전 점토

3.4 붕괴 원인과 대책공법 수립을 위한 지반조사자료 성과분석

1) 지질특성 분석

과업구간의 기반암은 백악기 경상누층군의 일직층 및 후평동층으로 구성되며 세일·사암 등으로 구성되어 있다. 노두 관찰시 사면 상부는 자색 세일과 사암층이 교호하며 하부는 흑색 세일이 분포한다. 과업구간 인근에는 좌수향 주향이동 단층인 '신령(백학동)단층'이 분포하며 부수단층 분포가 예상된다. 쇄설성 퇴적암의 1차 구조인 저각의 층리 발달, 다양한 방향성의 절리 및 파쇄대 확인할 수 있었다.

2) 시추조사와 영상촬영 결과를 이용한 지질 이상대 방향성 추출

시추공 영상자료를 분석한 결과 층리는 대체로 10/130(DIP/DIR) 방향 우세하며, 총 4조의 절리가 분포하고 있는 것으로 파악되었다.

3) 절리면 전개상태 분석

절리면 전개도 분석결과 저각 및 고각의 불연속면이 다양하게 분포하는 것으로 나타나며, 저각의 불연속면은 퇴적암의 층리로 판단된다. BH-3 지점에 분포하는 저각의 불연속면은 주로 층리가 투영된 것으로 판단되며, 심도 10.0~16.0m, 22.0~24.0m, 29.5~33.0m, 35.0~40.0m 구간 내 집중 발달하는 것으로 나타났다. BH-3 지점의 심도 10.0~13.0m 구간에 15°내외의 경사를 보이는 점토 충전구간이 집중 분포하며, 비탈면 옹벽 상부지점에서의 연장 가능성 내재하고 있다. BH-1의 심도 39.4m에서 확인된 토사화 구간은 옹벽 상부지점으로 연장성을 보이며, 심도 49.3m의 점토 충전구간 방향성은 옹벽 집중 파손부로 연장이 가능할 것으로 여겨진다.

4) 안정성 검토를 위한 지반정수 선정

추가 지반조사 중에 절리면 전단시험과 기반암 내 충전점토를 대상으로 직접전단시험 수행하였다. 당초 3차례에 걸친 사면 안정성 검토에서 사용된 물성치와 추가지반조사 후 얻어진 물성치를 비교해하였다. 시추공 내에서 수행된 절리면 전단시험의 경우 점착력 성분은 대폭 감소되었으나 내부마찰각의 경우 35.2°~37.9°로 설계값보다 크게 산정되었다. 조사 결과로 확인할 수 있듯이 리핑암부터 발파암까지 심한 풍화가 진행된 구간이 나타난다. 사면 활동 방향을 따라 발달된 파쇄와 코어유실에 의해 토체의 전단저항이 감소된 점을 감안하고 불확실한 지층의 특이성을 고려하여 파쇄대의 내부마찰각을 기존 설계값과 동일한 29.6°로 해석에 적용하였다.

사면활동을 지배하는 충전점토의 경우 원설계에서는 검토되지 않았으나 금회 직접전단시험에서 공학적 성질을 파악하였다. 점토충전층의 지반정수는 불안정성을 최소화 하고자 시험결과를 통해 획득한 값의 범위 내에서 가장 작은 값을 해석에 적용하였다. 탄질층의 경우 설계 변경시 역해석을 통하여 점착력 20kPa, 내부마찰각을 29°로 적용하였으나 앞서 언급한 바와 같이 조금 더 안정적인 검토를 위해, 과거 탄질층을 포함한 사면 중 안정을 확보한 사례의 물성치로 조정하여 검토 할 필요가 있다.

표 3.5 추가 지반조사시 획득된 지반물성치

구 분		c(kPa)		$\phi(^{\circ})$		비 고
		Peak	Residual	Peak	Residual	
절 리 면 전단시험	B H - 1	40.0	16.0	38.0	35.2	이질암
	B H - 2	44.0	3.0	38.8	36.2	
	B H - 3	38.0	7.0	40.8	37.9	
직 접 전단시험	B H - 1	7.3		23.9		충전점토
	B H - 2	11.9		26.2		
	B H - 3	8.1		24.5		

표 3.6 기존 안정성 검토시와 추가 지반조사시 산정한 지반물성치

구 분		기존	금회	해석 적용값
불 연 속 체	c (kPa)	40.0	3.0~16.0	10
	$\phi (^{\circ})$	29.6	35.2~37.9	29.6
충 전 점 토	c (kPa)	-	7.3~11.9	7.3
	$\phi (^{\circ})$	-	23.9~26.2	23.9
탄 질 층	c (kPa)	20.0	-	20
	$\phi (^{\circ})$	29.0	-	25

4. 활동 원인 분석과 대책 수립

4.1 퇴적암 사면의 예상 활동면 분석

국내에 분포하는 퇴적암층은 중생대의 퇴적암과 고생대 퇴적암층으로 분류할 수 있는데 중생대 퇴적암은 남해고속도로, 구마고속도로, 중앙고속도로의 경상남북도의 한반도 남동측 지대에 위치하고 고생대 퇴적암층은 옥천 지향사대가 지나는 경부고속도로 횡간, 중부고속도로 일부구간, 중앙고속도로 영주-제천구간, 동해고속도로에 주로 분포한다. 중생대 퇴적암에서는 지질구조선에 의한 붕괴와 풍화로 인한 붕괴로 크게 나눌 수 있다. 평면파괴유형이 가장 많은 빈도를 보이고 세일이 풍화로 의해 암편화의 낙석, 차별적인 풍화로 인한 낙석, 세굴문제, 풍화에 표면부에서의 원형파괴 양상이 우세한 것으로 나타난다.

퇴적암중 세일로 이루어진 사면의 풍화특성은 지표에 노출시 빠른 시간에 풍화를 받을 수 있으며 구마고속도로 사면은 하부에 호온펠스화 작용을 받은 경암질과 풍화를 받아 있는 연암층이 뚜렷한 경계면을 이루고 있다. 그러나 강원도 일대에 분포하는 고생대 퇴적암은 암질이 불량하고 단층 등의 구조선 및 주지질구조선에 의해 사면안정에 매우 취약하므로 세심한 주의를 기울여야 한다. 암석강도는 층리방향과 층리방향에 수직인 경우 암석강도에 큰 차이를 보이는 이방성의 특성을 보인다. 지질구조선은 20°내외의 경사를 갖는 층리가 우세하며 구마고속도로는 층리 경사방향이 도로방향으로 향해 있는 하행측 사면에서 사면안정의 문제가 발생되고 있다. 층리면에 점토질이 충전되어 있는 경우가 다소 있어 이로 인한 대규모의 평면파괴가 주를 이룬다. 붕괴 유형별 지질특성을 다음 표³⁾와 같이 정리할 수 있다.

금번 조사시 평면파괴를 유발할 수 있는 저각을 불연속면은 BH-3에서 심도 10.0~15.0m, 39.0~40.0m 부근에 집중되어 있다. 이는 비탈면의 경사방향과 유사한 방향으로 점토가 충전되어 활동 유발 가능성이 크고 파쇄대와 연계하였을 때 옹벽의 7~8단 구간과 교차하는 것으로 나타났다. 점토 충전대와 파쇄대의 분포를 조사한 내용을 근거로 약 15개의 활동을 일으킬 수 있는 파괴 포락선을 예상하였다.

활동이 발생한 사면의 경우 상부면에서는 인장균열, 중앙부는 배부름이나 침하, 하단부는 토사적치, 보강구조물 손상 등의 현상을 관찰할 수 있다. 암반 불연속면 발달상황과 충전물질의 종류와 강도 등이 활동면 형태와 규모가 달라지는데 검토 대상 현장의 경우 세일/사암이 교호하는 암반내 점토층이 협재된 층리면과 파쇄대가 수평과 수직방향으로 발달되어 있는 조사내용을 고려할 때 평면파괴와 원형파괴가 혼재되는 양상을 보일 것으로 판단한다. 특히 시추공에서 관찰되는 점토 협재층의 심도가 일정하지 않아 연장성이 수 m 정도일 것으로 보이는데 이는 사면 종단방향 대규모 활동보다는 연장성이 유지되거나 파괴면 전파범위까지 국한되는 규모일 것으로 보인다.

3) 지반분야 취약공종 기술매뉴얼 개발, 한국도로공사 도로교통연구원(2013)

표 4.1 퇴적암으로 이루어진 사면의 붕괴유형별 특징

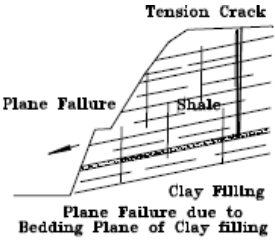
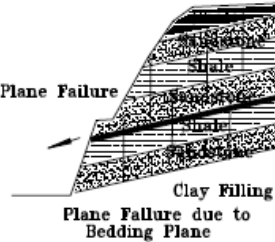
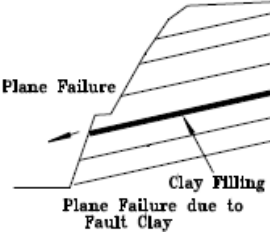
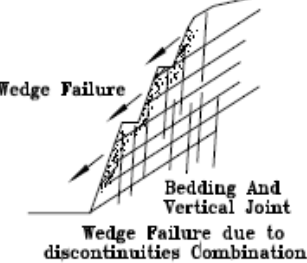
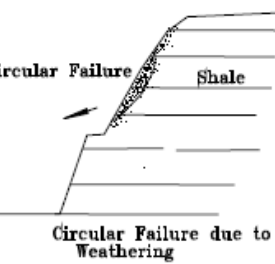
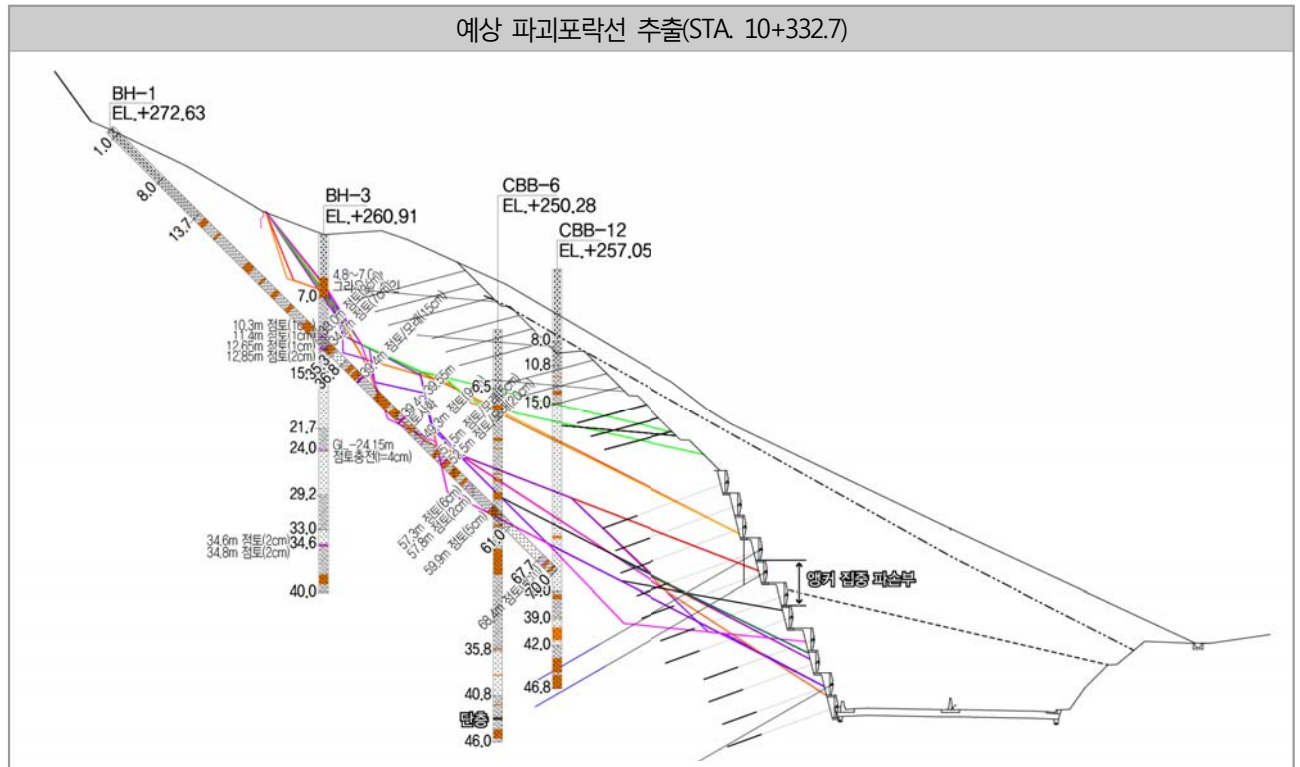
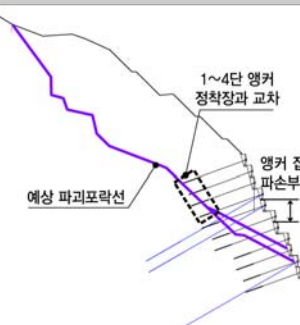
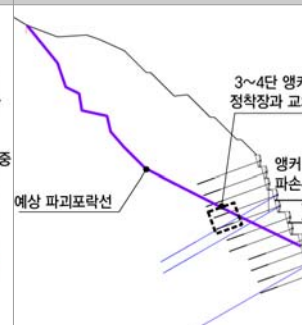
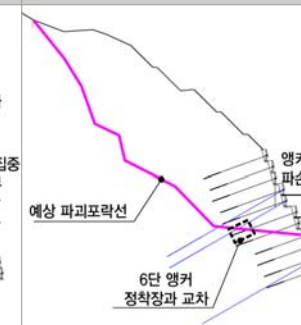
붕괴유형	사면활동	지질특징	비고
평면파괴 (미고결 점토층)		사면방향으로 경사진 층리면에 미고결 점토가 충전된 평면형 파괴가 발생하는 유형으로 세일내에 충전된 경우가 많았다. 수직절리는 인장균열의 역할을 하게 된다.	
사암과 세일 교호		사암과 세일이 교호되는 층에서 세일이 빗물이나 강우에 의해 풍화되어 붕괴되기도 한다. 석회암 및 고생대 퇴적암에서는 경사가 급한 층리면을 따라 평면파괴가 발생한다.	
단층파쇄대		사암과 세일로 이루어진 층의 층리면 사이에 대규모의 단층점토층이 충전되어 이면을 따라 활동된다. 이 붕괴유형은 매우 대규모적인 붕괴규모를 갖는다	
썰기파괴		경상분지의 중생대 퇴적암은 층리면의 경사가 완만하여 이와 같은 붕괴가 드물지만 고생대 퇴적암지에서 층리가 경사가 급하거나 심하게 왜곡되어 이 유형의 붕괴를 보이기도 한다.	
원형파괴		세일이 절토에 의해 지표면에 노출되면 풍화속도가 급속히 진전되어 작은 암편화된다. 이 작은 암편은 상호간의 점착력이 없어 강우에 의해 쉽게 토층과 같은 원형파괴유형을 보인다.	

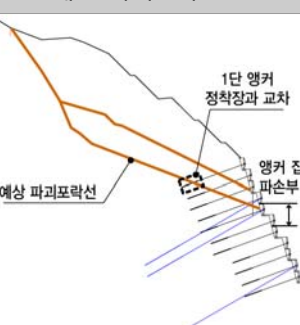
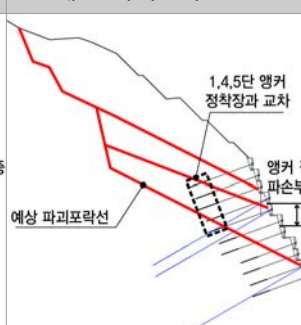
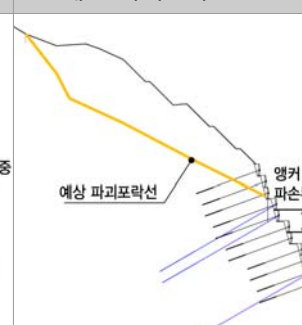
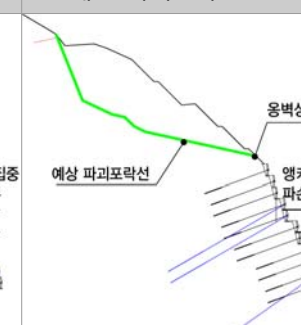
표 4.2 지질 이상대 위치 및 방향성을 고려한 예상 파괴 포락선

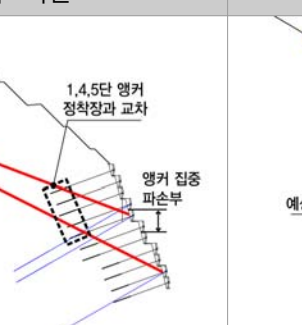


예상 파괴포락선 - 1	예상 파괴포락선 - 2	예상 파괴포락선 - 3	예상 파괴포락선 - 4
1~4단 앵커 정착장과 교차 앵커 집중 파손부 예상 파괴포락선	1~4단 앵커 정착장과 교차 앵커 집중 파손부 예상 파괴포락선	4~5단 앵커 정착장과 교차 앵커 집중 파손부 예상 파괴포락선	1단 앵커 정착장과 교차 앵커 집중 파손부 예상 파괴포락선
• 단일면의 계단상 파괴형태	• 단일면의 계단상 파괴형태	• 단일면의 원호형 파괴	• 단일면의 계단상 파괴형태

표 4.2 지질 이상대 위치 및 방향성을 고려한 예상 파괴 포락선(계속)

예상 파괴포락선 - 5	예상 파괴포락선 - 6	예상 파괴포락선 - 7	예상 파괴포락선 - 8
			
• 계단상+2차 Sliding 발생	• 단일면의 계단상 파괴형태	• 단일면의 계단상 파괴형태	• 옹벽 인접부 저각의 파괴

예상 파괴포락선 - 9	예상 파괴포락선 - 10	예상 파괴포락선 - 11	예상 파괴포락선 - 12
			
• 인장균열에서 2개선 파생	• 3조의 다중파괴선	• 예상파괴선 옹벽 3단과 교차	• 파괴선 옹벽 상부에 분포

예상 파괴포락선 - 13	예상 파괴포락선 - 14	예상 파괴포락선 - 15
		
• 파괴선 옹벽 상부에 분포	• 계단상+파괴포락선 상·하부 분할	• 계단상+파괴포락선 상·하부 분할

시추조사와 시추공내 영상 촬영을 통해 불연속면과 협재 상태를 확인하고 2017년 11월 당시 발견된 균열면과 영구앵커 탈락 상황을 종합할 때 다수의 활동선이 예상된다. 현재까지 사면 상부에서 균열이 발생된 점을 상부 기점으로 간주하고 앵커가 파손된 지점을 연결하는 선을 연결하면 7개 정도의 활동선을 얻을 수 있다. 앵커가 파손된 지점이 상부 5단부터

6단까지 집중되었고, 7, 8단은 시점쪽으로 편향되었으며 하부 10단은 간헐적으로 3개소가 파손되었다. 이는 우상향으로 분포된 탄층의 영향으로 하단부를 통과하는 활동면이 형성되었고, 상부 앵커는 활동토괴 내부에 정착장이 형성되어 있으므로 파손부위가 상대적으로 많은 것으로 판단된다.

추가 지반조사 자료와 사면활동 양상, 앵커부 파손 등을 종합하면 활동토체는 상부 균열면에서 하부 앵커 6~7단 부근을 통과하는 형태를 취하고 있으며, 층리면을 따라 단속적인 계단식 원호 형태인 것으로 판단된다.

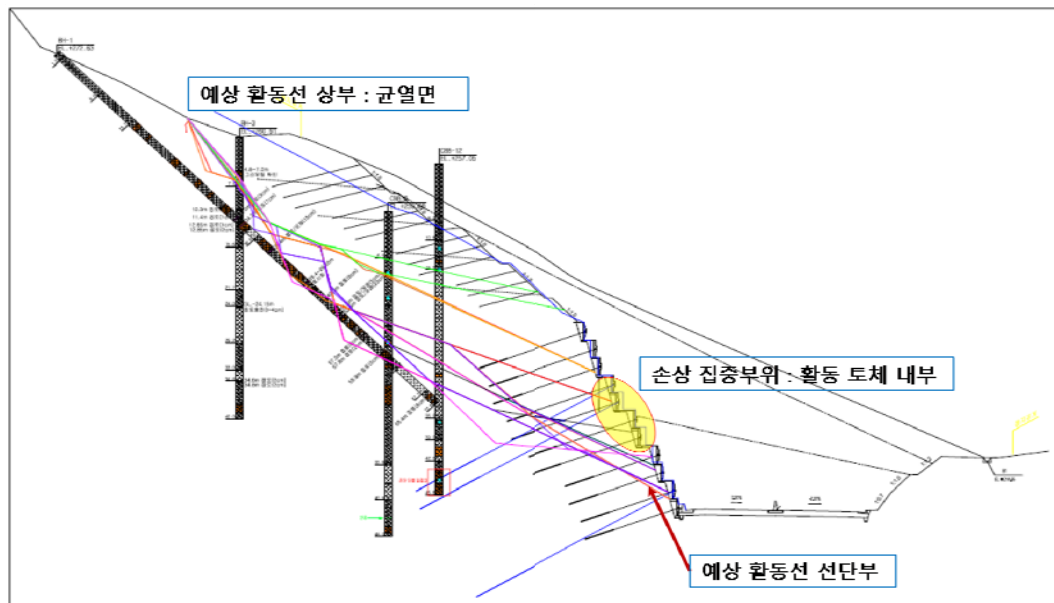


그림 4.1 추가 지반조사와 현장 손상 내용을 종합한 예상활동선



그림 4.2 추가 지반조사와 현장 손상 내용을 종합한 예상활동 방향

4.2 강수와 포항지진과의 연관성 분석

활동에 의한 피해가 관찰된 2017년 11월 기상청이 집계한 영천지역의 기상자료는 다음 그림과 같다. 최대 강수량은 0.1mm로 기록되어 단기적으로 사면 불안정을 초래할 만한 집중 강우는 없다고 판단된다. 사면을 구성하고 있는 지층 특성상 지표수 침투에 의해 점토질 충전물의 강도가 열화 될 수 있는 것은 장기적인 측면에서 침투 가능성도 고려하는 것이 합리적이다. 기상청 기후자료에서 보면 준공 이후 월별 강수량은 7월 181mm, 8월 192mm, 9월 91mm, 10월 58mm 기록되었다.

남씨달력 영천(무) / 2017년 7월

일요일	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토요일
						1일
						평균기온:27.7℃ 최고기온:31.6℃ 최저기온:25.0℃ 평균운량: - 일강수량:0.1mm
2일	3일	4일	5일	6일	7일	8일
평균기온:27.5℃ 최고기온:33.0℃ 최저기온:23.6℃ 평균운량: - 일강수량:2.0mm	평균기온:28.9℃ 최고기온:34.1℃ 최저기온:26.6℃ 평균운량: - 일강수량:0.2mm	평균기온:26.2℃ 최고기온:32.3℃ 최저기온:23.1℃ 평균운량: - 일강수량:7.0mm	평균기온:26.3℃ 최고기온:32.8℃ 최저기온:21.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:27.0℃ 최고기온:34.1℃ 최저기온:21.6℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:27.1℃ 최고기온:30.4℃ 최저기온:23.7℃ 평균운량: - 일강수량:1.0mm	평균기온:26.9℃ 최고기온:30.9℃ 최저기온:23.8℃ 평균운량: - 일강수량:1.0mm
9일	10일	11일	12일	13일	14일	15일
평균기온:29.2℃ 최고기온:36.1℃ 최저기온:24.1℃ 평균운량: - 일강수량:6.5mm	평균기온:28.9℃ 최고기온:33.2℃ 최저기온:25.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:29.7℃ 최고기온:33.9℃ 최저기온:27.1℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:30.4℃ 최고기온:37.5℃ 최저기온:24.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:30.4℃ 최고기온:38.9℃ 최저기온:22.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:27.1℃ 최고기온:35.8℃ 최저기온:21.8℃ 평균운량: - 일강수량:96.5mm	평균기온:25.6℃ 최고기온:29.6℃ 최저기온:22.2℃ 평균운량: - 일강수량:1.0mm
16일	17일	18일	19일	20일	21일	22일
평균기온:27.4℃ 최고기온:33.6℃ 최저기온:23.7℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:26.7℃ 최고기온:33.6℃ 최저기온:22.5℃ 평균운량: - 일강수량:8.5mm	평균기온:27.1℃ 최고기온:32.3℃ 최저기온:22.4℃ 평균운량: - 일강수량:0.5mm	평균기온:28.7℃ 최고기온:35.4℃ 최저기온:22.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:29.6℃ 최고기온:36.1℃ 최저기온:23.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:30.8℃ 최고기온:37.4℃ 최저기온:24.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:27.1℃ 최고기온:34.8℃ 최저기온:22.1℃ 평균운량: - 일강수량:1.5mm
23일	24일	25일	26일	27일	28일	29일
평균기온:27.1℃ 최고기온:31.8℃ 최저기온:22.2℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:27.9℃ 최고기온:35.4℃ 최저기온:25.9℃ 평균운량: - 일강수량:3.5mm	평균기온:25.1℃ 최고기온:26.4℃ 최저기온:22.8℃ 평균운량: - 일강수량:16.0mm	평균기온:24.3℃ 최고기온:29.4℃ 최저기온:19.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:25.2℃ 최고기온:32.7℃ 최저기온:16.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:26.8℃ 최고기온:33.5℃ 최저기온:20.1℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:23.0℃ 최고기온:25.6℃ 최저기온:22.2℃ 평균운량: - 일강수량:22.0mm
30일	31일					
평균기온:25.8℃ 최고기온:30.8℃ 최저기온:22.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:24.7℃ 최고기온:26.4℃ 최저기온:22.6℃ 평균운량: - 일강수량:14.0mm					

그림 4.3 영천지역 2017년 7월 기상자료(기상청)

날씨달력 영천(무) / 2017년 8월

일요일	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토요일
		1일	2일	3일	4일	5일
		평균기온:26.2℃ 최고기온:32.0℃ 최저기온:23.5℃ 평균운량: - 일강수량:2.5mm	평균기온:25.4℃ 최고기온:31.3℃ 최저기온:22.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:25.8℃ 최고기온:31.4℃ 최저기온:21.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:28.4℃ 최고기온:34.2℃ 최저기온:22.7℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:29.1℃ 최고기온:35.3℃ 최저기온:23.2℃ 평균운량: - 일강수량: -
6일	7일	8일	9일	10일	11일	12일
평균기온:29.9℃ 최고기온:37.1℃ 최저기온:24.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:28.7℃ 최고기온:36.3℃ 최저기온:24.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:28.9℃ 최고기온:35.4℃ 최저기온:22.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:26.5℃ 최고기온:29.6℃ 최저기온:24.5℃ 평균운량: - 일강수량:13.0mm	평균기온:24.8℃ 최고기온:27.4℃ 최저기온:23.3℃ 평균운량: - 일강수량:75.5mm	평균기온:25.3℃ 최고기온:30.7℃ 최저기온:21.8℃ 평균운량: - 일강수량:0.2mm	평균기온:24.3℃ 최고기온:29.1℃ 최저기온:20.5℃ 평균운량: - 일강수량: -
13일	14일	15일	16일	17일	18일	19일
평균기온:23.3℃ 최고기온:27.3℃ 최저기온:19.4℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:22.5℃ 최고기온:24.3℃ 최저기온:21.6℃ 평균운량: - 일강수량:56.0mm	평균기온:23.4℃ 최고기온:25.5℃ 최저기온:21.7℃ 평균운량: - 일강수량:14.5mm	평균기온:25.4℃ 최고기온:28.8℃ 최저기온:23.0℃ 평균운량: - 일강수량:2.0mm	평균기온:24.8℃ 최고기온:29.3℃ 최저기온:22.7℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:25.5℃ 최고기온:31.9℃ 최저기온:20.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:25.3℃ 최고기온:29.8℃ 최저기온:22.3℃ 평균운량: - 일강수량:5.0mm
20일	21일	22일	23일	24일	25일	26일
평균기온:25.5℃ 최고기온:29.1℃ 최저기온:23.3℃ 평균운량: - 일강수량:0.5mm	평균기온:25.6℃ 최고기온:32.0℃ 최저기온:23.4℃ 평균운량: - 일강수량:13.5mm	평균기온:27.3℃ 최고기온:32.7℃ 최저기온:23.2℃ 평균운량: - 일강수량:1.5mm	평균기온:29.0℃ 최고기온:35.1℃ 최저기온:23.9℃ 평균운량: - 일강수량:3.5mm	평균기온:29.9℃ 최고기온:34.7℃ 최저기온:24.8℃ 평균운량: - 일강수량:3.0mm	평균기온:27.0℃ 최고기온:33.1℃ 최저기온:21.1℃ 평균운량: - 일강수량:1.0mm	평균기온:23.6℃ 최고기온:31.8℃ 최저기온:16.8℃ 평균운량: - 일강수량: -
27일	28일	29일	30일	31일		
평균기온:22.4℃ 최고기온:30.5℃ 최저기온:15.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:25.3℃ 최고기온:32.6℃ 최저기온:17.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:25.8℃ 최고기온:31.8℃ 최저기온:20.1℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:20.9℃ 최고기온:25.8℃ 최저기온:17.1℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:20.6℃ 최고기온:28.2℃ 최저기온:13.5℃ 평균운량: - 일강수량: -		

그림 4.4 영천지역 2017년 8월 기상자료(기상청)

날씨답력 영천(무) / 2017년 9월

일요일	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토요일
					1일	2일
					평균기온:20.2℃ 최고기온:26.5℃ 최저기온:15.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:19.5℃ 최고기온:26.4℃ 최저기온:12.3℃ 평균운량: - 일강수량: -
3일	4일	5일	6일	7일	8일	9일
평균기온:20.4℃ 최고기온:27.4℃ 최저기온:13.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.2℃ 최고기온:27.4℃ 최저기온:16.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.3℃ 최고기온:26.2℃ 최저기온:16.9℃ 평균운량: - 일강수량:0.5mm	평균기온:21.4℃ 최고기온:25.4℃ 최저기온:18.4℃ 평균운량: - 일강수량:5.0mm	평균기온:21.9℃ 최고기온:28.6℃ 최저기온:18.0℃ 평균운량: - 일강수량:0.5mm	평균기온:22.7℃ 최고기온:30.3℃ 최저기온:15.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:22.4℃ 최고기온:31.2℃ 최저기온:16.0℃ 평균운량: - 일강수량: -
10일	11일	12일	13일	14일	15일	16일
평균기온:22.4℃ 최고기온:28.9℃ 최저기온:16.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:20.8℃ 최고기온:22.5℃ 최저기온:19.6℃ 평균운량: - 일강수량:41.5mm	평균기온:23.5℃ 최고기온:29.9℃ 최저기온:18.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.2℃ 최고기온:28.5℃ 최저기온:14.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:19.7℃ 최고기온:26.9℃ 최저기온:13.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:20.3℃ 최고기온:24.5℃ 최저기온:15.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.8℃ 최고기온:24.7℃ 최저기온:19.0℃ 평균운량: - 일강수량: -
17일	18일	19일	20일	21일	22일	23일
평균기온:21.6℃ 최고기온:24.9℃ 최저기온:17.3℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:20.6℃ 최고기온:28.6℃ 최저기온:14.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:22.0℃ 최고기온:29.1℃ 최저기온:13.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:20.3℃ 최고기온:25.7℃ 최저기온:12.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:18.4℃ 최고기온:27.4℃ 최저기온:9.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:19.8℃ 최고기온:28.1℃ 최저기온:12.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:20.2℃ 최고기온:27.6℃ 최저기온:13.7℃ 평균운량: - 일강수량: -
24일	25일	26일	27일	28일	29일	30일
평균기온:20.6℃ 최고기온:29.3℃ 최저기온:12.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:20.8℃ 최고기온:29.4℃ 최저기온:14.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.0℃ 최고기온:28.7℃ 최저기온:13.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:18.4℃ 최고기온:20.1℃ 최저기온:16.7℃ 평균운량: - 일강수량:43.0mm	평균기온:19.9℃ 최고기온:26.2℃ 최저기온:15.7℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:15.9℃ 최고기온:22.3℃ 최저기온:10.6℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:16.1℃ 최고기온:27.0℃ 최저기온:6.3℃ 평균운량: - 일강수량: -

그림 4.5 영천지역 2017년 9월 기상자료(기상청)

남씨답력 영천(무) / 2017년 10월

일요일	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토요일
1일	2일	3일	4일	5일	6일	7일
평균기온:15.9℃ 최고기온:21.0℃ 최저기온:9.5℃ 평균운량: - 일강수량:5.0mm	평균기온:20.3℃ 최고기온:24.8℃ 최저기온:17.6℃ 평균운량: - 일강수량:16.5mm	평균기온:18.9℃ 최고기온:23.1℃ 최저기온:15.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:17.3℃ 최고기온:21.7℃ 최저기온:13.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:15.8℃ 최고기온:21.3℃ 최저기온:12.2℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:16.4℃ 최고기온:19.2℃ 최저기온:14.0℃ 평균운량: - 일강수량:8.0mm	평균기온:19.9℃ 최고기온:24.5℃ 최저기온:16.9℃ 평균운량: - 일강수량: -
8일	9일	10일	11일	12일	13일	14일
평균기온:21.0℃ 최고기온:28.0℃ 최저기온:16.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.1℃ 최고기온:29.1℃ 최저기온:16.7℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:21.9℃ 최고기온:29.3℃ 최저기온:15.6℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:19.9℃ 최고기온:24.1℃ 최저기온:16.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:14.5℃ 최고기온:17.0℃ 최저기온:13.8℃ 평균운량: - 일강수량:28.5mm	평균기온:14.3℃ 최고기온:20.6℃ 최저기온:10.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:14.5℃ 최고기온:20.9℃ 최저기온:10.2℃ 평균운량: - 일강수량: -
15일	16일	17일	18일	19일	20일	21일
평균기온:15.3℃ 최고기온:19.7℃ 최저기온:11.0℃ 평균운량: - 일강수량:0.2mm	평균기온:15.2℃ 최고기온:19.7℃ 최저기온:10.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:15.0℃ 최고기온:22.5℃ 최저기온:7.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:16.4℃ 최고기온:18.7℃ 최저기온:14.4℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:14.8℃ 최고기온:19.4℃ 최저기온:11.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:14.4℃ 최고기온:21.5℃ 최저기온:9.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:14.5℃ 최고기온:22.0℃ 최저기온:7.0℃ 평균운량: - 일강수량: -
22일	23일	24일	25일	26일	27일	28일
평균기온:17.0℃ 최고기온:21.0℃ 최저기온:11.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:13.4℃ 최고기온:19.2℃ 최저기온:7.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:11.0℃ 최고기온:18.0℃ 최저기온:6.3℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:10.5℃ 최고기온:20.1℃ 최저기온:4.6℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:11.0℃ 최고기온:19.8℃ 최저기온:3.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:13.7℃ 최고기온:21.7℃ 최저기온:7.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:15.0℃ 최고기온:22.2℃ 최저기온:8.8℃ 평균운량: - 일강수량: -
29일	30일	31일				
평균기온:14.4℃ 최고기온:22.7℃ 최저기온:8.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:9.1℃ 최고기온:15.2℃ 최저기온:3.6℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:7.5℃ 최고기온:18.6℃ 최저기온:-1.6℃ 평균운량: - 일강수량: -				

그림 4.6 영천지역 2017년 10월 기상자료(기상청)

날씨달력 영천(무) / 2017년 11월

일요일	월요일	화요일	수요일	목요일	금요일	토요일
			1일	2일	3일	4일
			평균기온:11.1℃ 최고기온:19.8℃ 최저기온:2.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:11.5℃ 최고기온:19.9℃ 최저기온:5.7℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:11.7℃ 최고기온:21.0℃ 최저기온:4.9℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:8.1℃ 최고기온:15.3℃ 최저기온:2.4℃ 평균운량: - 일강수량: -
5일	6일	7일	8일	9일	10일	11일
평균기온:8.0℃ 최고기온:16.4℃ 최저기온:1.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:8.3℃ 최고기온:19.8℃ 최저기온:-1.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:12.6℃ 최고기온:21.0℃ 최저기온:2.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:14.6℃ 최고기온:21.5℃ 최저기온:9.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:9.2℃ 최고기온:19.3℃ 최저기온:1.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:12.1℃ 최고기온:21.2℃ 최저기온:2.5℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:6.9℃ 최고기온:13.3℃ 최저기온:-0.4℃ 평균운량: - 일강수량: -
12일	13일	14일	15일	16일	17일	18일
평균기온:4.6℃ 최고기온:14.9℃ 최저기온:-3.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:6.6℃ 최고기온:16.4℃ 최저기온:-2.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:9.6℃ 최고기온:16.1℃ 최저기온:3.4℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:6.6℃ 최고기온:11.8℃ 최저기온:0.8℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:3.1℃ 최고기온:10.0℃ 최저기온:-2.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:4.3℃ 최고기온:11.9℃ 최저기온:-5.1℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:3.8℃ 최고기온:9.2℃ 최저기온:-1.5℃ 평균운량: - 일강수량: -
19일	20일	21일	22일	23일	24일	25일
평균기온:1.5℃ 최고기온:5.9℃ 최저기온:-3.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:3.7℃ 최고기온:9.0℃ 최저기온:-1.5℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:2.3℃ 최고기온:12.8℃ 최저기온:-5.0℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:5.2℃ 최고기온:11.7℃ 최저기온:-2.6℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:3.0℃ 최고기온:7.8℃ 최저기온:-1.6℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:2.1℃ 최고기온:7.6℃ 최저기온:-1.6℃ 평균운량: - 일강수량:0.1mm	평균기온:3.3℃ 최고기온:10.5℃ 최저기온:-5.8℃ 평균운량: - 일강수량: -
26일	27일	28일	29일	30일		
평균기온:6.0℃ 최고기온:13.9℃ 최저기온:-1.3℃ 평균운량: - 일강수량:0.0mm	평균기온:4.9℃ 최고기온:15.3℃ 최저기온:-2.2℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:6.6℃ 최고기온:16.8℃ 최저기온:-0.9℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:8.8℃ 최고기온:14.8℃ 최저기온:1.3℃ 평균운량: - 일강수량: -	평균기온:4.2℃ 최고기온:8.6℃ 최저기온:-1.2℃ 평균운량: - 일강수량: -		

그림 4.7 영천지역 2017년 11월 기상자료(기상청)

2017년 11월 15일 오후 2시 20분 경에 포항시 북구 북쪽 8km 지역(36.12°N, 129.36°E)에서 발생한 규모 5.4 지진으로 인해 대구지역에서는 진도 IV로 측정되었다. 기상청이 설명한 진도란 어떤 한 지점에서 사람이 느낀 정도 또는 구조물 피해정도를 계급화한 것으로서 진앙으로부터 거리에 따라 차이가 난다. 진도는 I에서 X까지 12개 계급으로 나누어지는데, 대체로 지진의 진앙(발생지점) 부근이 가장 높고 진앙에서 멀어질수록 낮아진다. 수정메르칼리 진도계급표(MMI)에 따르면 진도 VI는 모든 사람들이 느끼며, 많은 사람들이 놀라서 밖으로 뛰어나가며 무거운 가구가 움직이기도 하며, 벽의 석회가 떨어지기도 하는 것으로 설명된다.

진도 VI는 지진가속도가 0.06~0.07g에 해당하는 정도다. 현재까지 관측된 국내 지진의 특성은 해안을 제외하고 대부분 암반지반으로서 단주기 고주파 특징을 보인다. 1978년부터 2017년까지의 주요 계기 지진은 규모 4.9~5.8이다. 검토대상 지역은 경북지역으로 구역계수는 0.11을 적용하여 내진설계를 수행한다. 지진관성력은 파괴토체의 중심에 수평방향으로 작용시키고 최소 안전율은 1.1 이상이 되도록 한다.

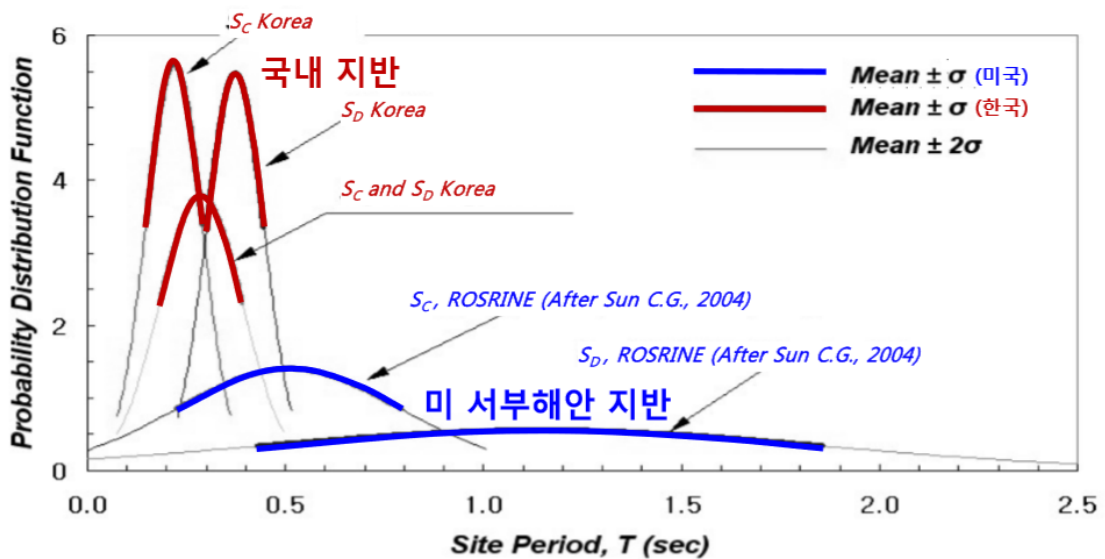


그림 4.8 국내 지진 특성

포항 지진과 관련된 현장 측정자료나 피해 유발 여부는 불확실하다. 2016년 11월에 작성된 추가 설계시 비탈면 깎기 7, 8구간에 대해 0.154g로 적용하여 안정성을 확인한 바 있다. 지진시 사면안정에 미치는 영향을 확인하기 위하여 포항 지진시 관측된 진도 VI(0.07g)을 작용 조건으로 기존 보강된 구간에 대하여 사면안정 해석을 수행하였다. 해석 결과 아래 정리된 바와 같이 긴급보강 전·후 모두 지진시의 기준안전율(F.S=1.1)을 만족하므로 지진하중에 의한 사면의 안정성 저하요인은 예상되지 않는다.

기존 보강 시 지진하중 적용 안전율 F.S = 1.239 > 1.1



긴급 보강 후 지진하중 적용 안전율 $F.S. = 1.301 > 1.1$

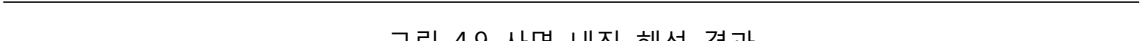


그림 4.9 사면 내진 해석 결과

4.3 계측자료 분석

깎기비탈면 계측은 비탈면 표면의 이동, 지층의 이동, 기상과 지하수위의 변화등을 측정하고 이로부터 설계시 예측한 거동이 적절했는지를 확인하여 구체적인 설계를 하거나, 기 설계된 내용을 보완하거나 향후 유지관리를 고려하여 계획한다.⁴⁾ 시공 중 활동이 발생하였거나 검토 대상 지역과 같이 사면 내에 내재적으로 취약요소가 있는 경우에는 안정을 확보한 이후에도 주기적으로 거동상태를 확인하는 것이 바람직하다.

상주영천고속도로가 개통된 이후에 해당 구간에서 사면 거동을 살펴보기 위해 사면 내 10개소에 광파측량 타켓을 설치하였고, 2017년 11월 이후 11개소를 추가하였다. 2017년 12월 영구앵커 보강공사가 진행되면서 앵커 두부에 하중계를 5개소(4단 2개소, 5단 1개소, 6단 1개소, 10단 1개소)를 설치하여 현재까지 거동 상태를 측정하고 있다. 상주영천고속도로가 개통된 이후 2017. 7. 26~2018. 3. 7까지 측정된 누적 수평변위는 4~69mm 정도인데 보강공사 후에는 0~3mm정도로써 보강공사 전에 대부분 수평변위가 발생하였다. 이는 추가로 설치한 영구앵커의 정착부가 활동면 외부에 위치하여 효과적으로 지지능력을 발휘하고 있는 것으로 평가된다.

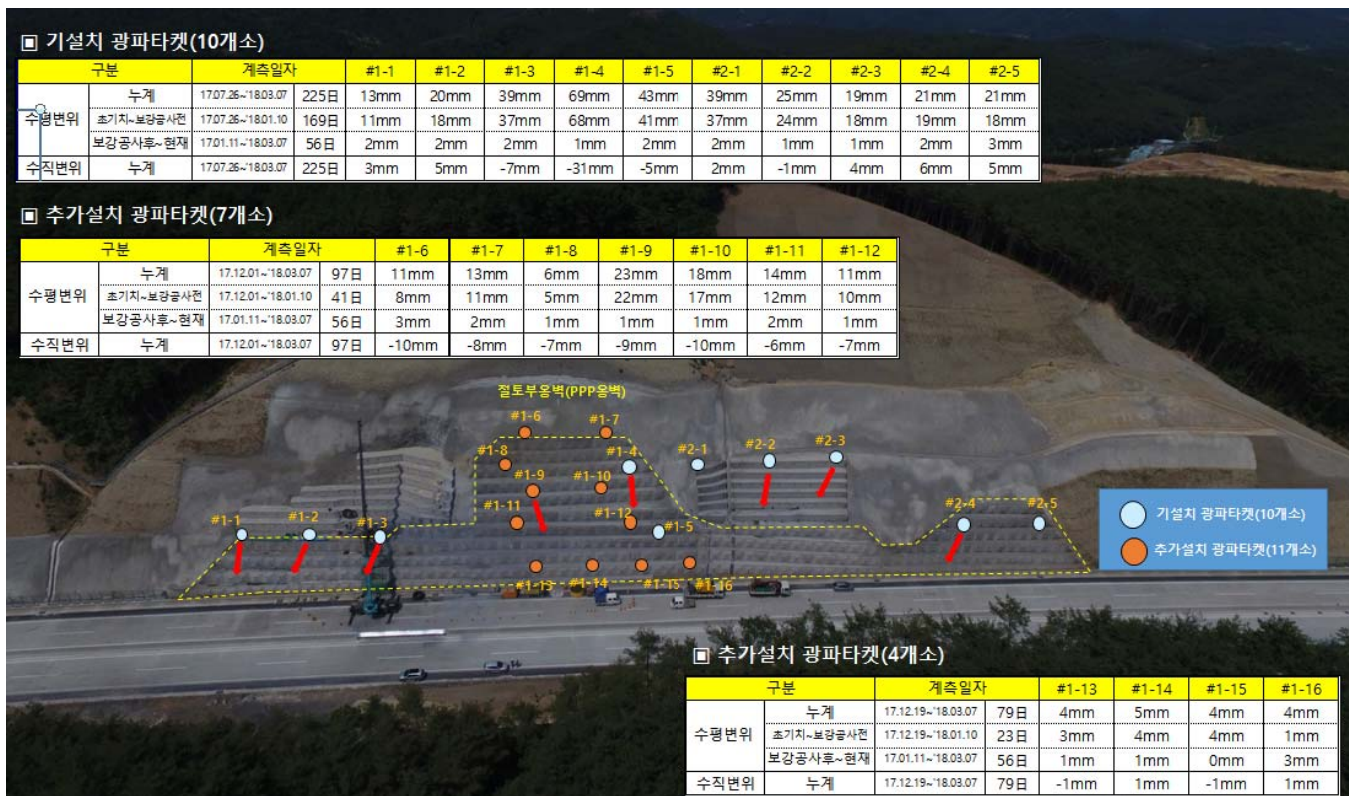


그림 4.10 사면내 광파 타켓 계측 현황

4) 건설공사 비탈면 설계기준(국토해양부, 2011)

앵커 두부에 설치된 하중계의 경우 초기치 설정후 최초 측정값 대비 0.3~1.2ton 정도의 변화를 보이고 있다. 하중계는 어스앵커가 두부에서 받는 힘의 정도를 지시하는 계측기기로서 정착부가 고정되어 있는 상태에서 하중이 증가하는 것은 활동토체가 거동을 하고 있다는 것을 의미한다. 반면에 하중값이 줄게 되는 배경은 단기적으로는 정착부에서 마찰저항이 모자라서 인발되는 경우, 두부정착부에서 콘이 느슨하게 되는 경우 등이다. 장기적으로 측정값이 완만하게 감소하는 경우는 안정을 찾고 그 상태를 문제점 없이 유지하는 상황을 설명한다. 앵커가 설치된 후 3% 미만에서 거동하고 있는 현재 상황은 양호하게 시공되어 정착부 주변 토층에서 마찰저항이 손실없이 발휘되면서 효과적으로 전면 옹벽을 지지하고 있는 것으로 평가할 수 있으며, 앞에서 설명한 수평변위가 증가하고 있지 않은 것과 동일한 거동 양상으로 파악할 수 있다.

● 하중계 설치 5개소

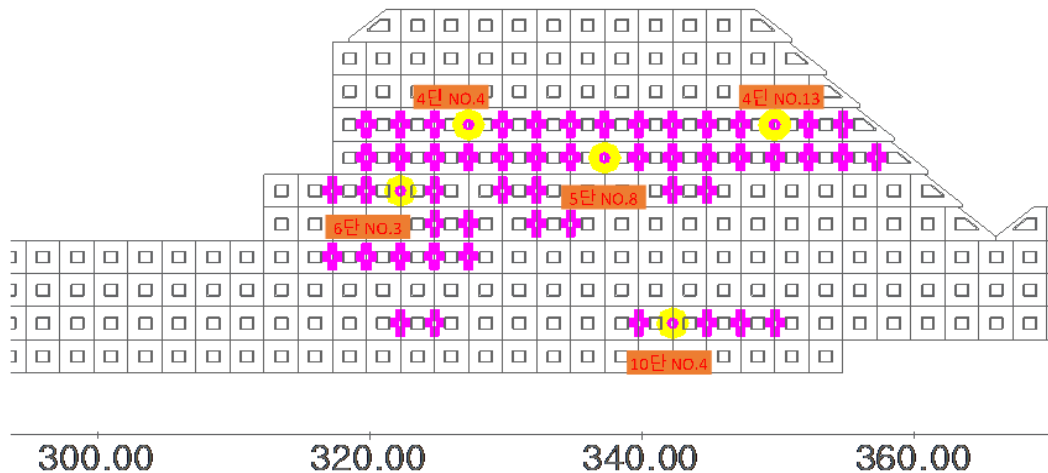


그림 4.11 사면내 하중계 계측 현황

표 4.3 하중계 계측 자료

구분		4단 No.4	4단 No.13	5단 No.8	6단 No.3	10단 No.4	비고
1월5일	측정값	37.1ton	36.6ton	37.9ton	40.5ton	33.5ton	
	최초대비	-	-	-	-	-	
	전회대비	-	-	-	-	-	
1월9일	측정값	37.5ton	36.7ton	57.5ton	40.6ton	40.8ton	5단 No.8 및 10단 No.4 재인장 후 측정 실시
	최초대비	0.4ton	0.1ton	19.6ton	0.1ton	7.3ton	
	전회대비	0.4ton	0.1ton	19.6ton	0.1ton	7.3ton	
1월17일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	42.6ton	40.1ton	1월12일 재인장 후 측정 실시 (초기치 값임)
	최초대비						
	전회대비						
1월24일	측정값	38.9ton	36.9ton	57.8ton	43.0ton	40.4ton	
	최초대비	0.2ton	0.3ton	0.4ton	0.4ton	0.3ton	
	전회대비	0.2ton	0.3ton	0.4ton	0.4ton	0.3ton	
1월31일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	42.9ton	40.0ton	
	최초대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.3ton	-0.1ton	
	전회대비	-0.2ton	-0.3ton	-0.4ton	-0.1ton	-0.4ton	
2월7일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	43.0ton	40.0ton	
	최초대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.4ton	-0.1ton	
	전회대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.1ton	0.0ton	
2월21일	측정값	38.8ton	36.8ton	57.7ton	43.3ton	40.2ton	
	최초대비	0.1ton	0.2ton	0.3ton	0.7ton	0.1ton	
	전회대비	0.1ton	0.2ton	0.3ton	0.3ton	0.2ton	
2월28일	측정값	38.8ton	36.7ton	57.6ton	43.2ton	40.3ton	
	최초대비	0.1ton	0.1ton	0.2ton	0.6ton	0.2ton	
	전회대비	0.0ton	-0.1ton	-0.1ton	-0.1ton	0.1ton	
3월7일	측정값	39.0ton	36.9ton	58.0ton	43.8ton	40.6ton	2/28~3/7 일 감수량 65mm
	최초대비	0.3ton	0.3ton	0.6ton	1.2ton	0.5ton	
	전회대비	0.2ton	0.2ton	0.4ton	0.6ton	0.3ton	

4.4 준공 후 보강대책 적용(2017. 12)의 적절성 분석

2017년 11월에 기존 보강된 구간에 대해 점검한 결과 앵커가 손상된 것이 관찰되었다. 긴급보강을 위해 절토부옹벽과 계단식옹벽에 영구앵커를 각각 55개소 및 27개소를 추가 시공하였다. 절토부옹벽의 경우 4단에 15개소, 10단에 7개소를 30m길이를 설치하였는데 그림 4.1에서 표기된 바와 같이 예상활동 파괴면 후방에 정착부가 위치하게 되었다. 계단식옹벽의 경우 좌측 10개소, 우측 17개소에 20m길이의 앵커를 추가 시공하였으며, 사면 정상의 인장균열부는 시멘트 밀크 그라우팅으로 충전하였다. 계측결과에서 보듯이 시공 완료 직후 수평변위는 현저하게 증가추세가 멈췄고 2018년 3월까지 안정을 유지하고 있다.

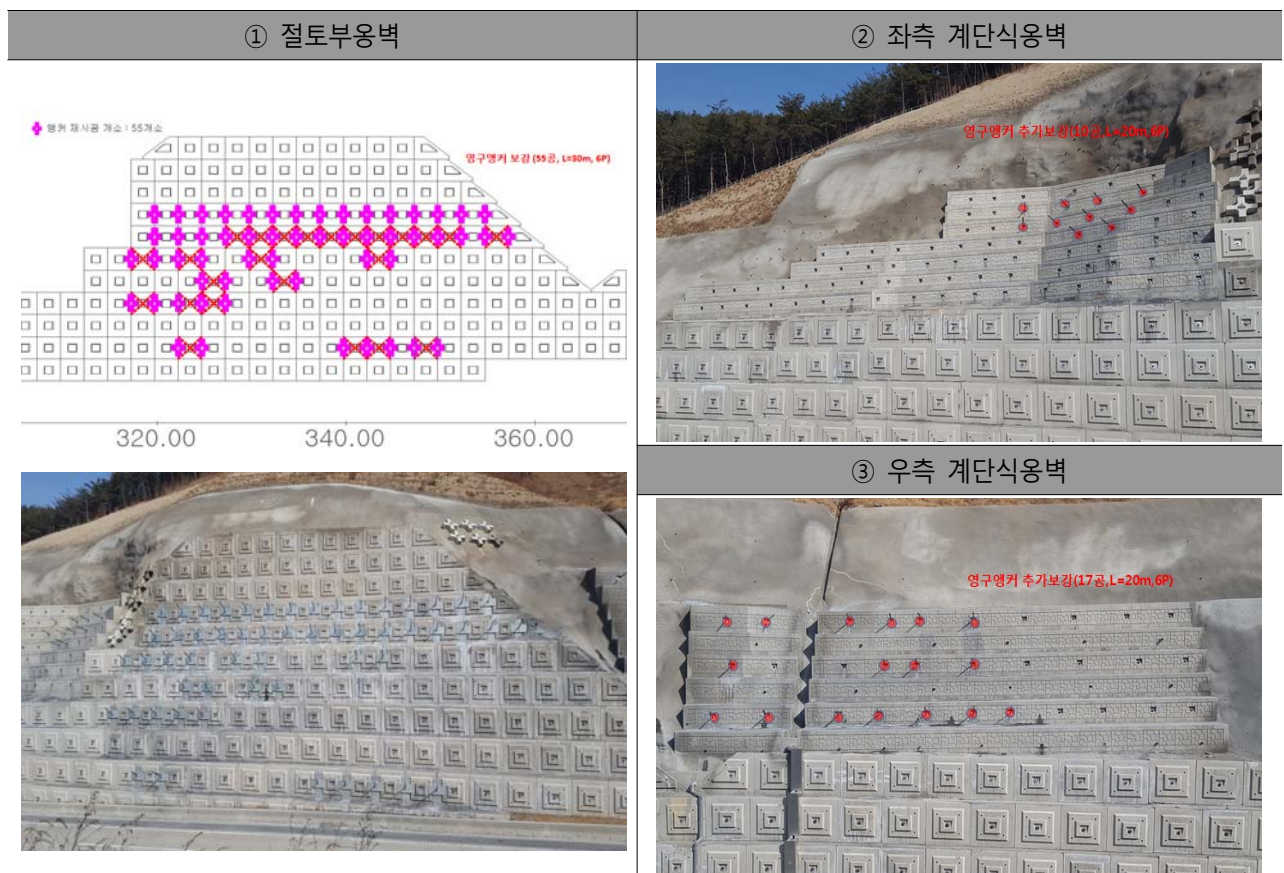


그림 4.12 사면 보강 조치 내용

영구앵커 55공 추가 보강에 대한 적절성을 평가하기 위하여 보강 전·후에 대한 한계평형해석을 수행하여 안정성을 확인하였다. 일반적인 깎기 비탈면의 검토 대상구간 선정 조건은 다음과 같으며, 본 과업현장의 사면 상부 균열, 옹벽과 어스앵커부의 탈락 등의 사면활동 이력을 고려하여 검토 대상구간을 선정하였다.

표 4.4 깎기 비탈면의 검토 대상구간 선정 조건

구 분	선 정 기 준
깎기부	· 절취 높이가 20m를 넘는 땅깎기의 경우 · 침식에 약한 토질(저고결도의 토사, 풍화암) · 붕적층, 퇴적층의 지반구성이 우세한 경우 · 주변의 기존구조물에 악영향을 미칠 정도로 예상되는 경우 · 현재까지 비탈면 활동이나 산허리 붕괴의 이력이 있고 불안정한 상태에 있는 지반의 경우

검토 적용 위치는 2회에 걸쳐 보강공사가 수행되었으나 2017년 11월 27일에 앵커부 파손이 관찰된 STA.10+300~STA.10+360 구간 중 사면 상부 인장균열과 산마루 측구 변형 발생으로 추정된 활동 방향을 고려하여 STA.10+340로 선정하였다. 해당 검토 위치는 기존 보강 앵커 11단 중 4, 5, 10단 위치에 연장 30m(정착장 10m)로 추가 보강되었다. 지층 분포 및 특성과 손상내용 조건에 근접한 단면을 모델링하고 추가 지반조사 결과를 분석하여 설정한 파괴 가능 포락선을 검토에 적용하였다.

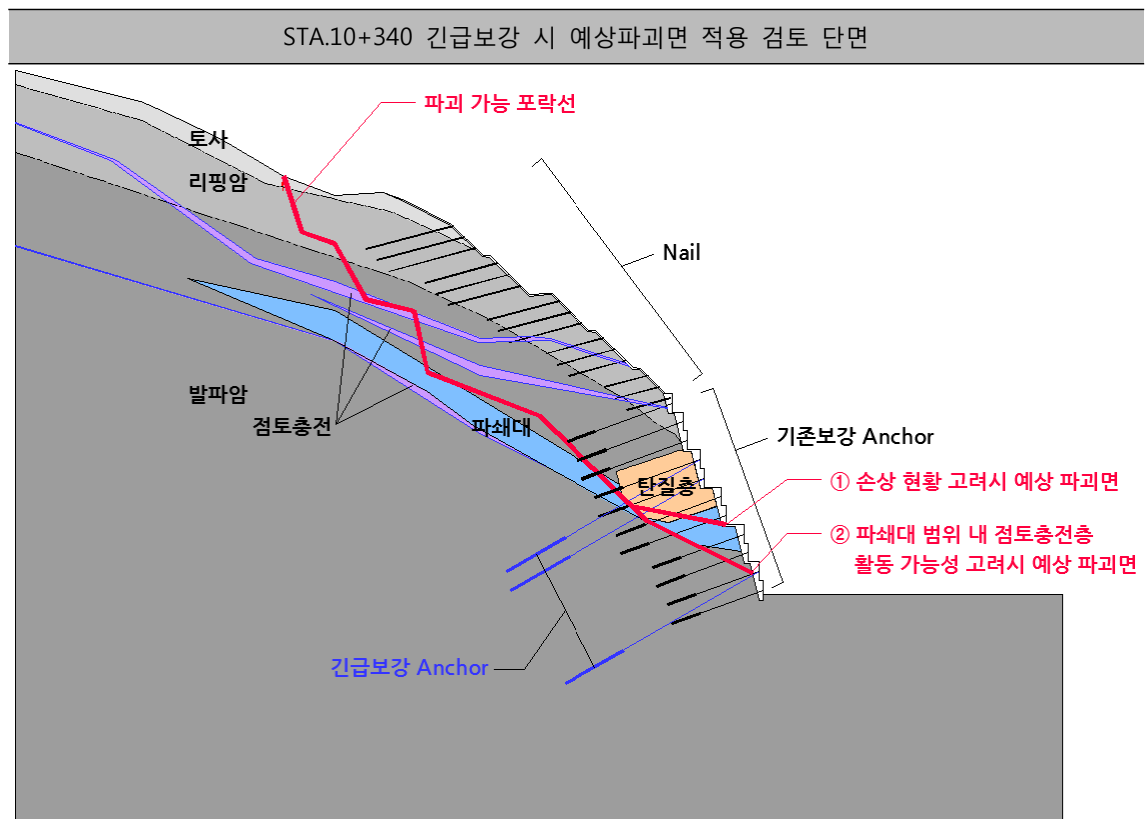


그림 4.13 붕괴발생에 대한 사면안정 해석단면 선정(STA.10+340)

비탈면안정해석 프로그램으로 MIDAS SoilWorks를 사용하였으며, Nail, Anchor 보강에 따른 비탈면의 안정성을 한계평형법(Limit Equilibrium Method)으로 검토하였다. 한계평형법은 지반을 하나의 토체로 간주하여 임의의 파괴면에 대한 힘 또는 모멘트 평형조건을 고려하는 해석법으로 깎기 비탈면 안정해석에 널리 사용되고 있다. SoilWorks는 다양한 이론으로 토사/암반 비탈면의 안전율을 계산하는 비탈면 안정해석 전문 프로그램이다. SoilWorks의 포괄적인 공식화는 안전율(The factor of safety)을 계산하기 위한 다양한 방법들을 선택하고, 층서(Stratigraphic), 간단하거나 복잡한 Geometric, 하중상태>Loading condition)를 분석하는 것이 가능하다.

다수의 Soil(Material types), Partial Submergence, 다양한 두께와 불연속적인 Soil 층들과 뚫고 지나갈 수 없는 층들(Impenetrable Soil Layer) 그리고 건조하거나 포화된 인장 균열과 같은 문제들을 포함하여 대부분의 안정성 문제를 계산할 수 있다. SoilWorks는 다음과 같은 이론으로 절편 간 힘의 크기와 방향을 정의할 수 있다. 다양한 비탈면 내 측압계수들은 수학적으로 더 정확한 Morgenstern-Price법이나 GLE 절편법으로 사용될 수 있다.

- Ordinary/Fellenius법
- Corps-of-Engineers 법
- Bishop 간편법
- GLE(General Limit Equilibrium) 법
- Janbu 간편법
- Lowe-Karafiath 법
- Spencer 법
- Finite Element Stress 법
- Morgenstern-Price 법

분할법(Slice Method)은 가상활동파괴의 단면을 연직선으로 구분하여 몇 개의 절편으로 나누고, 절편의 저면에 작용하는 활동력과 이 면에서 발휘되는 전단저항력의 비 또는 이들 힘에 의한 특정점(원호 활동면에서는 원의 중심점) 주위의 모멘트의 비로 나타내는 안전율을 검토하는 비탈면 안정해석법으로서, 비탈면의 형상이 복잡하고 지층구성이 불균질하며, 간극수압이 존재하는 일반 비탈면에 대한 안정해석법으로서, 일반 비탈면에 대한 안정 해석에 매우 효과적이고 우수한 방법이며, 비탈면 파괴의 형태가 복잡한 복합 활동면에 대한 해석 및 절편의 측면에 작용하는 부정정 내력인 절편 간의 힘을 고려한 해석 등 폭넓은 내용의 계산을 컴퓨터에 의하여 능률적으로 처리할 수 있는 이점이 있다.

본 비탈면 안정 검토시 해석방법으로 Bishop의 절편법을 적용하였으며, 이 방법은 절편법 가운데 가장 널리 사용되고 있고 그 결과는 이론상으로 정확한 다른 방법과 별 차이가 없다. Bishop(1995)은 아래 그림에 보인 바와 같이 원호 활동면에 비탈면 안정해석법을 발표하였다. 그러나 이 방법은 가상 회전중심을 사용함으로써 비원호 활동면에 대해서도 적용할 수 있다. 이 방법은 절편간 작용력이 수평 방향으로 작용한다고 가정한다. 각 절편의 저면에 작용하는 수직력 P는 연직방향 힘의 평형 조건에서 구한다. 수직력 P는 다음과 같다.

$$P = \left[W - \frac{1}{F} (c' \cdot l \cdot \sin \alpha - u \cdot l \cdot \tan \varphi' \cdot \sin \alpha) \right] \frac{1}{m_\alpha} \quad (4.1)$$

여기서, m_α 는 식 2.1과 같고 아래 그림에서도 구할 수 있다.

$$m_\alpha = \cos\alpha \left(1 + \tan\alpha \frac{\tan\phi'}{F}\right) \quad (4.2)$$

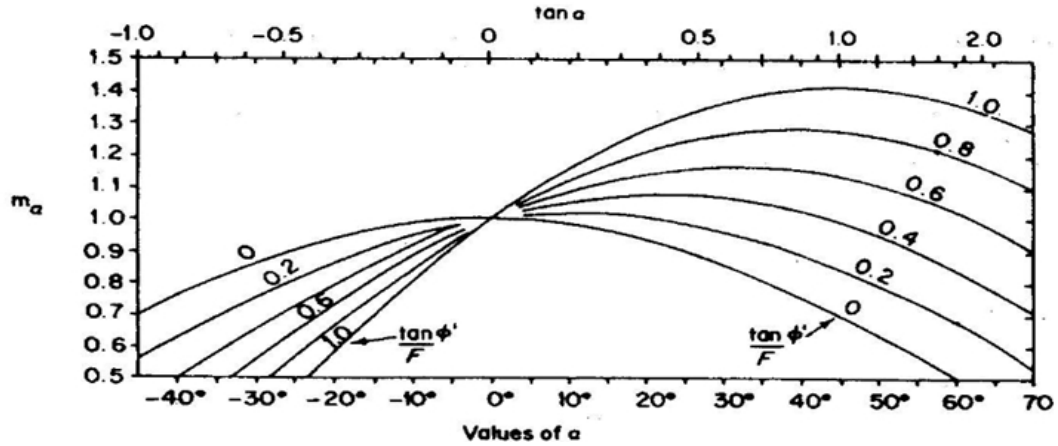


그림 4.14 Plot of factor m_α against inclination of base of slice α

회전중심에 대한 모멘트 평형을 취함으로써 안전율 $F=F_m$ 을 구할 수 있다. F 는 아래의 (식 4.3)으로 주어진다.

$$F_m = \frac{\sum(c'l + (P - ul)\tan\phi')}{\sum W \sin\alpha} \quad (4.3)$$

(식 4.3)의 양변에 안전율이 있으므로 안전율은 시행 착오법으로 구한다. 즉 우변의 안전율에 초기치를 가정하고 (식 4.3)에 의하여 새로운 안전율을 산정한다. 새로운 안전율을 우변에 대입하면서 계산을 반복하되 두 안전율의 오차가 허용범위보다 작아질 때의 안전율을 비탈면의 안전율로 한다. 수렴은 보통 대단히 빠르고 수계산도 가능하다. 안전율의 초기치는 보통 Fellenius 안전율을 기준으로 결정한다. 간극수압이 작을 때에는 전응력 해석법이나 유효응력 해석법 모두 $[F]_{\text{Bishop}} = (1.1) [F]_{\text{Fellenius}}$. 간극수압이 보통 내지 큰 경우에는 유효응력 해석법에서는 $[F]_{\text{Bishop}} = (1.2 \sim 1.25) [F]_{\text{Fellenius}}$ 가 초기치 결정의 지침이 된다. 절편 저면의 경사각 α 는 양과 음의 값 중 어느 것이나 될 수 있다. 안전율을 구하는 (식 4.3)에 포함된 항 $(1 + \tan\alpha \tan\phi'/F)$ 은 0이나 음의 값이 될 수 있다. 이러한 일은 경사 선단 부에서 활동면의 경사가 대단히 급해서 α 가 큰 음의 값이고 ϕ' 가 0이 아닌 경우에 일어날 수 있다(Whitman and Bailey, 1967). $\alpha = \phi'_m - 90^\circ$ 이면 이 항은 0이 된다.

여기서 $\tan\phi'_m = \tan\phi'/F$ 이다.(Wright, 1975) 이 항이 0에 가까워짐에 따라 안전율은 과대평가 되어 진다. 왜냐하면 절편 저면의 수직력 P 가 무한대가 되기 때문이다. 그러나 활동면의 경사가 더 급해지면 안전율은 과소평가 되는데 그 이유는 저면의 수직력이 음의 값이 되어 전단저항의 방향을 틀리게 하기 때문이다. Bishop의 절편법으로 얻은 안전율은 그 정확도가 실용상 충분한 것으로 평가되고 있다. 그 주된 이유는 모멘트 평형이 만족되는 경우 안전율은 절편 간 작용력에 대한 가정에 둔감하게 반응하기 때문이다.

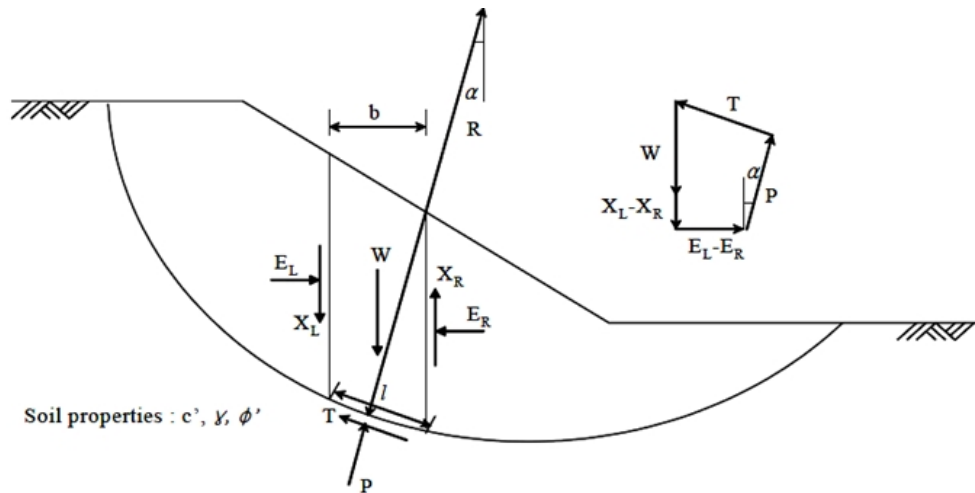


그림 4.15 Bishop's simplified method of slices (From Bishop, 1955)

해석 시 지반정수는 표 4.5와 같이 토사층, 리핑암, 발파암에 대하여 원설계와 기존 해석과의 일치성이 유지되도록 동일한 값을 사용하였으며, 발파암 구간 중 사면 활동 방향으로 발달된 지질이상대 영역을 파쇄대로 구분하고 불량한 암질상태와 풍화상태, 코어유실 등을 감안하여 지반정수를 적용하였다. 시추조사로 확인된 점토충전부의 두께와 연결성을 고려하고 탄질층은 설계변경 시 STA.10+340 단면에 대하여 현장조사에 의한 위치(대한건설ENC, 사면안정해석)를 반영하였으며, 지반정수는 3.4절에서 기술한 바와 같이 시험 및 인근사례와 비교 검토하여 조정된 값을 적용하였다.

표 4.5 해석 적용 지반 정수

지 층	단위중량 (kN/m ³)	점착력 (kPa)	내부마찰각 (°)
토사층	19.0	20.0	28.0
리핑암	20.0	30.0	29.0
발파암	24.0	40.0	29.6
파쇄대	23.0	10.0	29.6
탄질층	20.0	20.0	25.0
충전점토	17.0	7.3	23.9

표 4.6 깎기 비탈면의 검토 적용 안전율

구 분		최소안전율(Minimum Safety Factor) 기준	
깎기부	건기시	F.S > 1.5	국토교통부 건설공사비탈면설계기준
	지진시	F.S > 1.1	

해석 결과에 대한 안전율은 국토교통부 건설공사 비탈면 설계기준을 기준하여 안정성을 검토하였다. 기존보강 시 최소안전율은 1.394로 기준안전율(1.5) 미만으로 산정되었고 기존보강 이후 앵커 5단의 기능이 상실된 점을 고려하면 긴급 보강 이전 안전율은 더 저하된 상태로 판단할 수 있다. 파손 발생현황을 반영하여 긴급 보강 시 앵커 추가 설치에 대한 해석을 수행한 결과 안전율은 파괴면 범위 내에서 1.467~1.505로 산정되어 긴급보강 이전 상태보다 안전율이 증가하는 결과를 나타내었다.

예상 파괴면 범위는 상기 기술한 현황분석 내용과 같이 앵커 파손이 집중된 5단, 6단과 그 영향이 하부 7단에서 8단까지 미치는 상태에대한 파괴면 적용 시 기준안전율을 상회하는 결과를 나타내어 긴급보강 당시 확인된 탄질층 하단 취약부에 대하여 적절한 보강이 이루어졌음을 확인할 수 있다. 그러나 추가지반조사 분석 결과에 의한 파쇄대 하부와 발파암 경계에 존재하는 점토충전층의 거동가능성과 사면 활동 방향으로의 불연속면 영향을 무시할 수 없다.

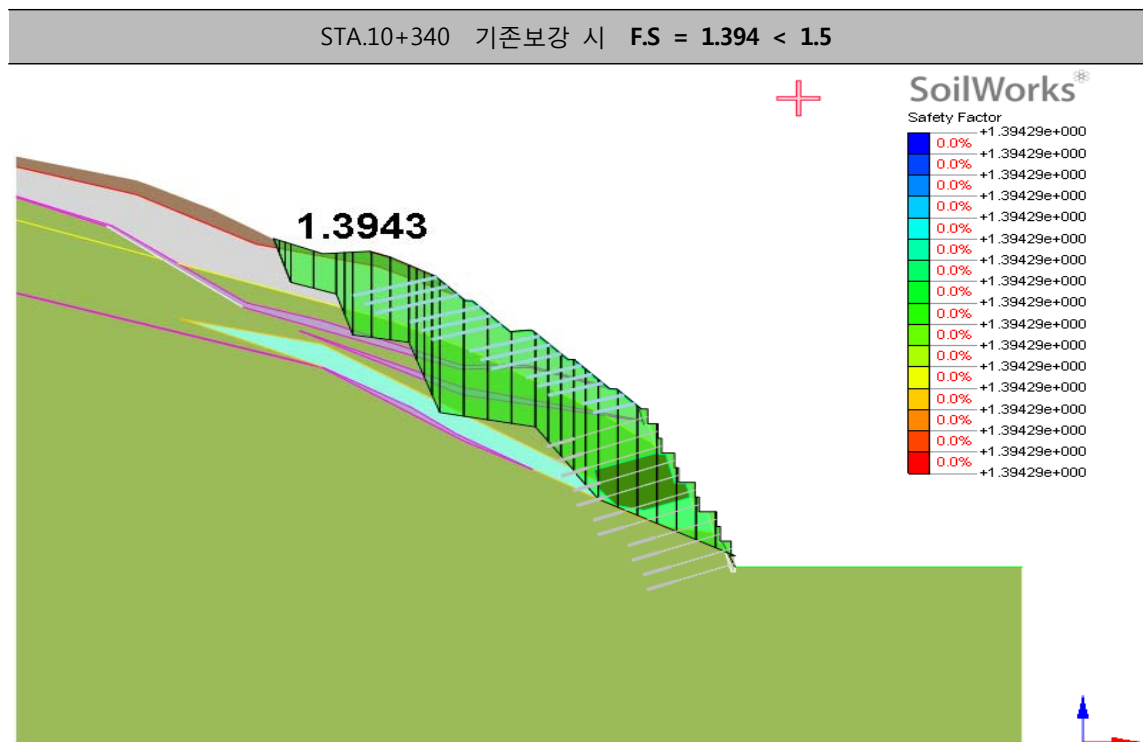


그림 4.16 STA.10+340 기존보강 시 해석결과(건기시)

STA.10+340 손상현황을 반영한 파괴면 적용 **F.S = 1.505 > 1.5**

STA.10+340 파쇄대와 점토충전층 활동가능성을 고려한 파괴면 적용 **F.S = 1.466 < 1.5**

그림 4.17 STA.10+340 긴급보강 시 해석결과(건기시)

4.5 장기 안정성 확보를 위한 대책 수립

퇴적암반으로 구성된 사면의 안정대책은 세일과 사암이 교호하면서 발생하는 차별풍화, 협재물질의 강도저하, 탄질층의 토사화 등의 암반의 특성을 충분히 파악하여 적절한 안정대책 공을 적용하여야 한다. 특히 퇴적암으로 이루어진 한반도 남동지대에서는 퇴적층의 층리방향을 반드시 고려하여야 하며 장기적인 지반특성 변화도 반영할 필요가 있다. 사면보강 공법은 보호공법(안전율 유지)과 보강공법(안전율 증가)으로 구분된다. 퇴적암반 사면에서는 층리면과 협재물 조건에 따라 적극적인 보강공법과 대기중 노출에 따른 풍화를 방지하기 위한 보호공법이 동시에 적용되는 것이 일반적이다.

본 현장의 경우 탄질층이 나타났던 하부는 콘크리트 옹벽으로 피복되었고, 상부 사면도 슛크리트가 시공되어 대기중 노출에 의한 열화현상은 발생할 가능성이 낮다. 층리면을 따라 지하수가 출입하면서 강도를 저하시킬 가능성이 있으므로 안전율 유지를 위하여 지표수가 사면내로 침투되는 것을 방지하도록 산마루 측구와 같은 배제공을 설치하고 지하수를 수평 배수공을 통해 적극적으로 배수시키는 것이 필수적이다. 또한 추후 해빙기와 장마기간 동안 계측관리를 통해 안정성을 계속 확인하는 것이 바람직하다.

2017년 12월에 긴급 보강으로 활동토체를 지지할 수 있는 영구앵커가 절토부옹벽에 55개소, 절토부옹벽 좌우측에 위치한 계단식옹벽에 27개소가 추가 설치된 상태고, 현재까지의 계측 결과상 추가적인 변형이 없는 것으로 관찰되고 있다. 현재 검토구간 사면의 안전율은 1.467~1.505로 잠정적인 안정을 나타내고 있으나 퇴적암반층에 내재된 점토 충전물의 거동은 침투에 의한 강도 저하, 시간의존성 변형 등의 요소가 내포되어 있으므로 장기적인 안정성 확보를 위하여 추가적인 보강대책을 적용하는 것이 바람직하다.

추가 앵커 시공이 안전율 증가에 대한 적절한 보강이 될 수 있으며, 정착부를 활동파괴선 후방에 위치하도록 설치하여 사면 상부의 초기변형을 억제하는 것이 장기적인 안정성을 유지하는데 효과적이다. 옹벽부 상단에 영구앵커로 추가 보강하여 점토충전층에서 발생할 수 있는 거동을 조기에 제어함으로써 추후 본 과업구간에 대한 사면활동 영향을 효과적으로 저감시킬 수 있다.

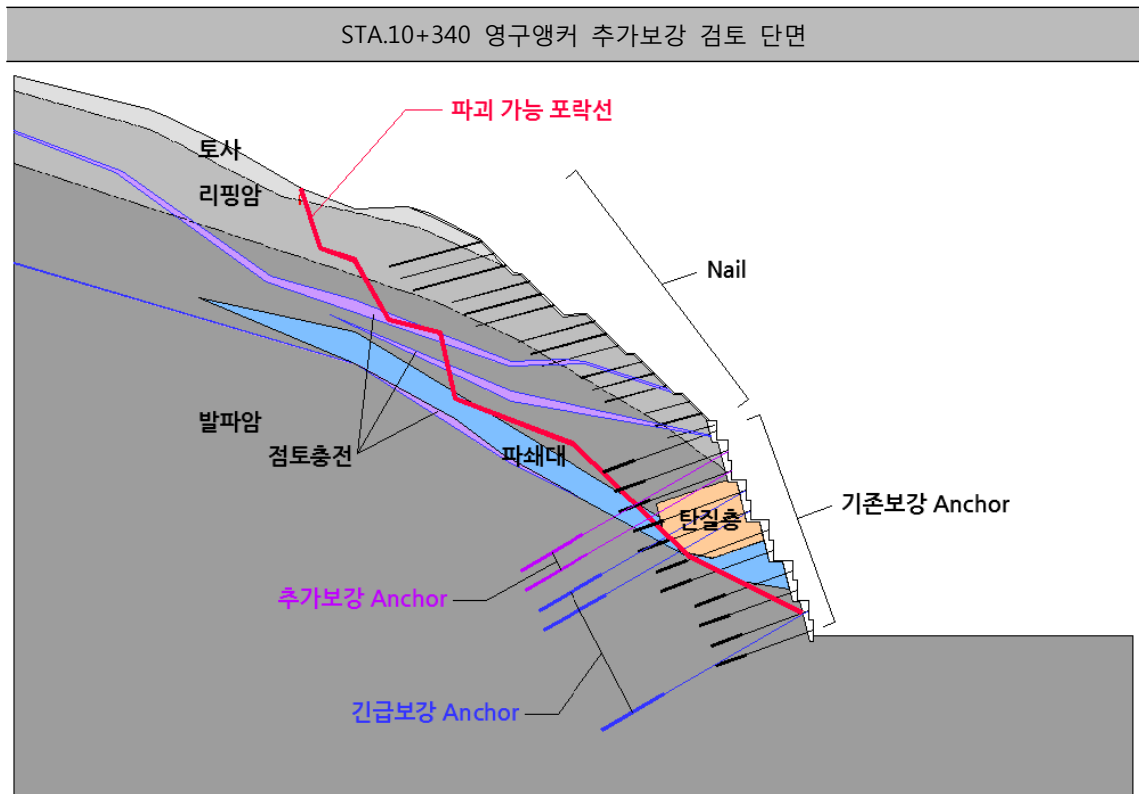


그림 4.18 장기안정성 확보를 위한 추가보강 방안

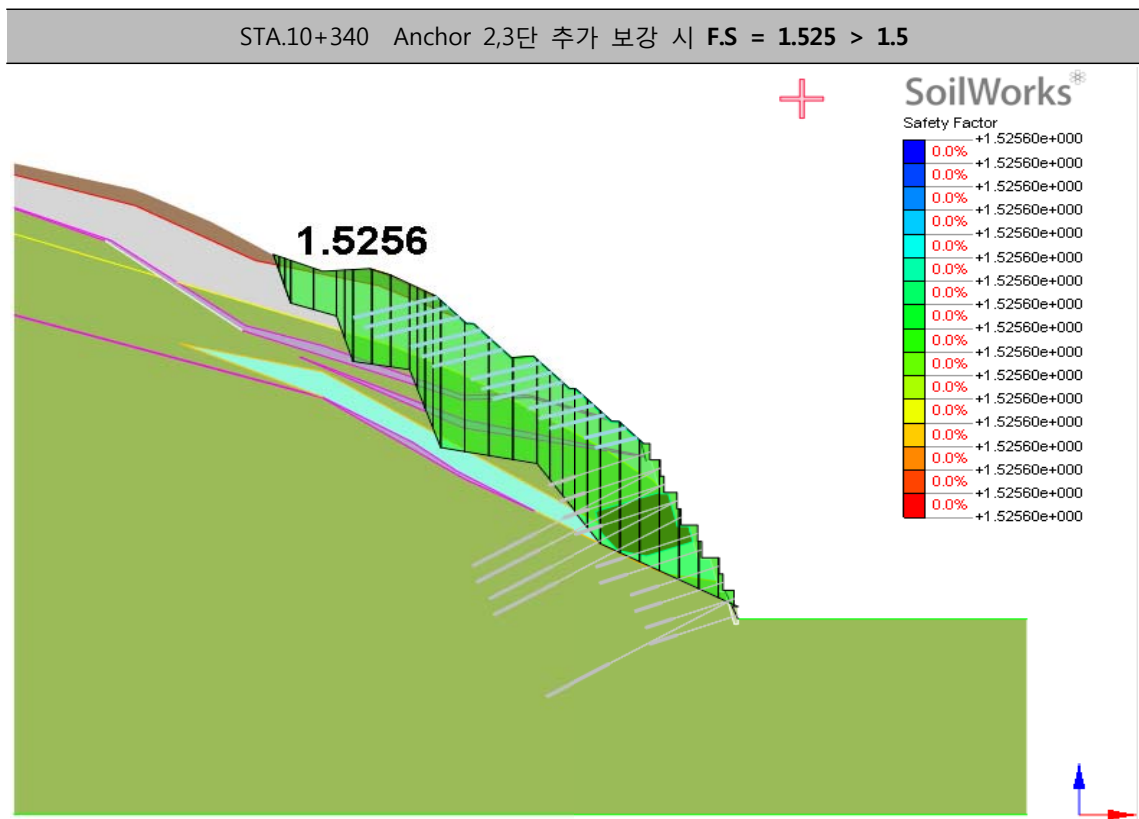


그림 4.19 STA.10+340 앵커 추가보강 시 해석결과(건기시)

4.6 장기 안정성 대책 적용 안정성 분석

본 검토 구간은 사면 상부 인장균열과 활동 이력으로 인하여 시기에 따라 미끌림이 발생할 수 있는 조건을 내재하고 있다. 사면 상부는 일부 그라우팅이 되어있기 때문에 지표면이 피복되어 있는 상태로 볼 수 있으나 토사층이 지표수로 포화될 경우 일시적인 강도저하를 유발하여 사면 활동에 영향을 미칠 수 있다. 추가앵커로 긴급보강이 이루어진 구간의 장기적인 안정성 예측을 위하여 사면 상부 인장균열에 수압이 작용할 경우에 대한 안정성을 검토하였다.

표 4.7 깎기 비탈면의 기준 안전율

구 분		기준안전율	참 조
깎기부	우기시	$F.S > 1.2$	- 연암 및 경암 등으로 구성된 암반비탈면의 경우, 인장균열 내 지하수 포화 높이나 활동면을 따라 지하수로 포화된 비탈면 높이의 1/2 심도까지 지하수를 위치시키고 해석을 수행하며 이 경우 $F.S = 1.2$ 적용 - 지하수위를 결정하여 해석하는 경우에는 현장 지반조사 결과, 지형조건 등을 종합적으로 고려하여 지하수위를 결정하고 안정해석을 수행하며, 지하수위를 결정한 근거를 명확히 기술 ($F.S = 1.2$ 적용)

활동이 발생하여 사면 내부에 균열이 형성된 경우에는 지표수 유입에 의해 균열면을 따라 수압이 작용되며, 균열부 주변의 포화도가 증가할 수 있으므로 사면 불안정성 요인으로 작용한다. 포화도 증가에 따라 점착력이 감소하므로 강도에 영향을 미치는 중요한 요소로서, 국내·외 수많은 시험 사례로 입증되어 일반적인 강도특성 개념으로 사용되고 있다. 그림 4.20과 같이 지하수위는 추가지반조사 시 측정된 수위(BH-3) GL-22.7m를 해석에 적용하였으며, 사면 상부에 확인된 인장균열 위치에서 부터 설정된 파괴면을 따라 수압이 발생하는 조건으로 해석하였다.

본 현장의 경우 균열 발생 후 내부를 시멘트 페이스트로 주입하였고, 지반조사 상 층리면을 따라 충전된 점토가 단속적인 상태다. 이때 지표수의 침투는 유선이 단속적이고 내부 투수성도 차이가 있는 상태이므로 지속적인 유입수가 없는 조건에서 100% 포화된다고 보기 어렵다. 그러나 해석의 안정성 측면에서 인장균열 내 포화도 90%로 수압을 작용시켰다.

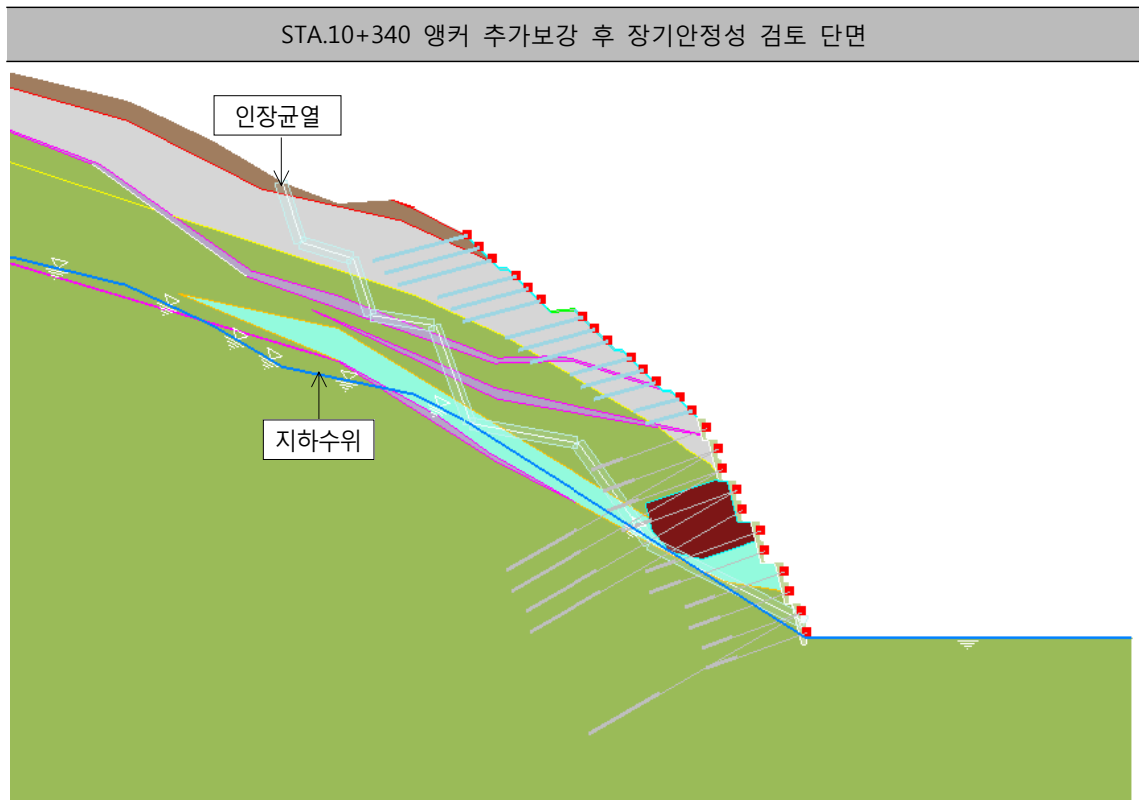
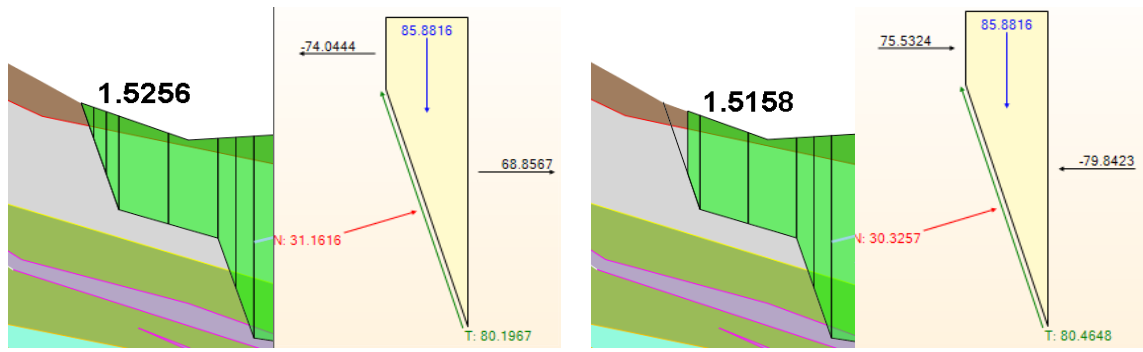


그림 4.20 장기안정성 검토단면(우기시, 인장균열 수압작용 조건)

사면부 지하수위 측정 결과 지표하 20m 이하 경암층에 수위가 분포하고 있고 사면 전면으로 배수가 유도되고 있으므로 침투에 의한 지하수위 상승 가능성은 낮은 조건이다. 해석 결과 최소안전율은 1.515로 인장균열 발생위치에서 파괴면을 따라 수압이 작용하지 않는 조건에서 해석된 최소안전율(1.525) 보다 0.01 정도 감소하였고, 그림 4.21과 같이 동일한 절편에서 사면 활동 방향으로 발생하는 작용력에 대한 저항력이 미소하게 증가되는 것으로 나타났으나 전체 사면에 대한 불안정 요소로 작용한다고 판단하기는 어렵다. 우기시 조건으로 검토된 최소안전율이 기준안전율(1.2)을 만족하므로 장기적으로 침투에 의한 안정성 저하는 예상되지 않는다.

추가 지반조사의 결과에서 볼 수 있듯이 사면 내에 점토 충전층이 분포하며 이미 발생한 사면활동의 결과로 불규칙하게 분포하는 내재 균열면을 따라 추후 사면 활동의 가능성을 배제할 수 없다. 2017년 12월에 지표에서 균열면 하부로 주입한 시멘트 페이스트 균열폭, 발생현황, 주변 토층과의 마찰저항 등의 요인에 의해 형성될 수 있는 주입에 대한 불확실성을 감안하여 균열면 후방에서 지표수가 유입되지 않도록 측구, 유도 성토 등의 지표수 배제공을 즉시 적용할 필요가 있다. 또한 해빙기와 우기를 지나는 동안 계측관리를 주기적으로 시행하고 이상거동 발생 여부를 확인하는 것이 바람직하다.



(a) 인장균열 수압 미작용 시

(b) 인장균열 수압 작용 시

그림 4.21 STA.10+340 인장균열 수압 작용 여부에 따른 해석결과

STA.10+340 추가 보강 인장균열 수압작용 시 $F.S = 1.515 > 1.2$

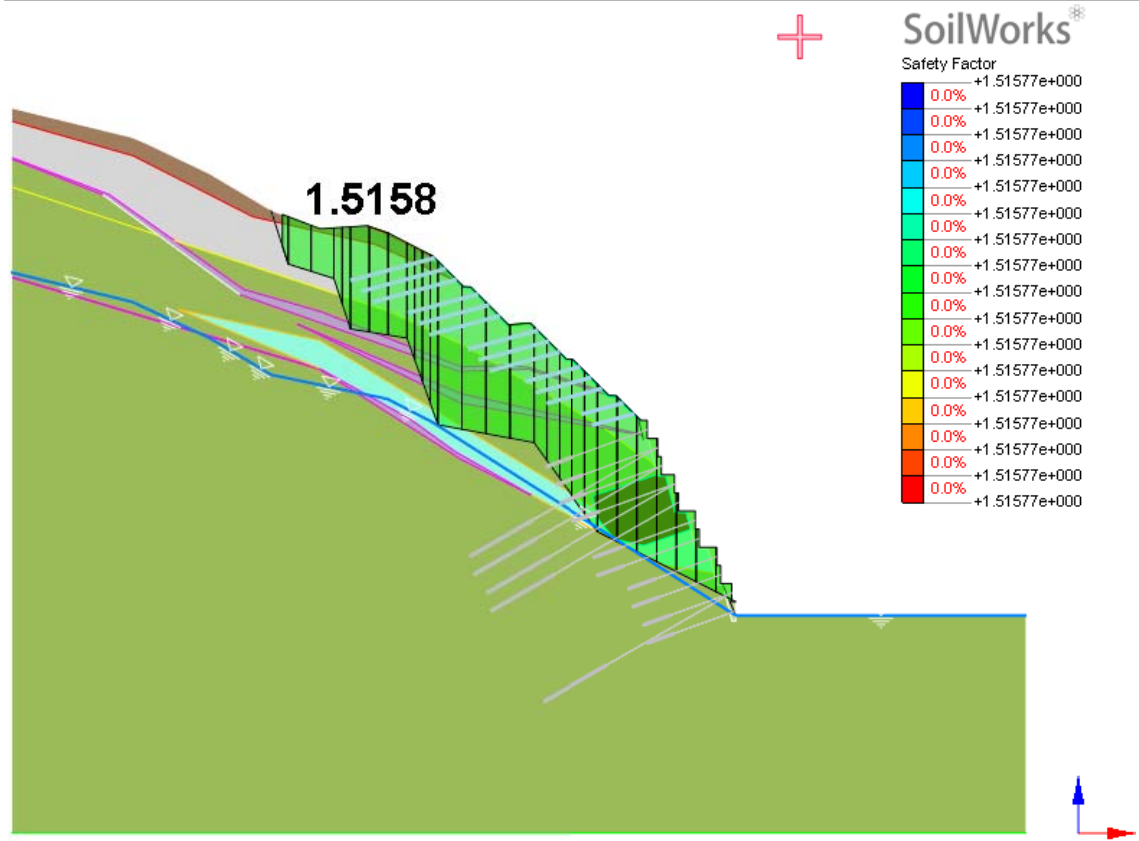


그림 4.22 STA.10+340 장기안정 해석결과(우기시)

5. 추가 활동 분석과 대책 수립

5.1 추가 활동 관찰내용

2018년 4월 3일 전수조사 시 과업현장 STA.10+320~STA.10+360 절토부 옹벽구간에서 기존 보강 된 앵커 11개소의 추가 파손이 확인되었다. 파손 현황은 그림 5.1과 같이 앵커 6단~9단에서 두부 파손과 패널 펀칭파괴가 일어났고 STA.10+320 1단 패널과 10단 추가앵커 시 공부 패널에 균열이 발생하였다. 추가적인 손상에 대하여 옹벽 상부 콘크리트의 유격 상태를 조사한 결과 9단, 10단 상부의 천단콘크리트가 1cm~2cm 유격이 발생하였다. 2017년 12월 1일 조사 시 앵커가 파손된 PPP옹벽 5단과 6단 상부 천단콘크리트에서 균열 및 옹벽 벌어짐 현상이 발생되었으나 금회 조사 시 큰 변화는 없는 것으로 관찰되었다.

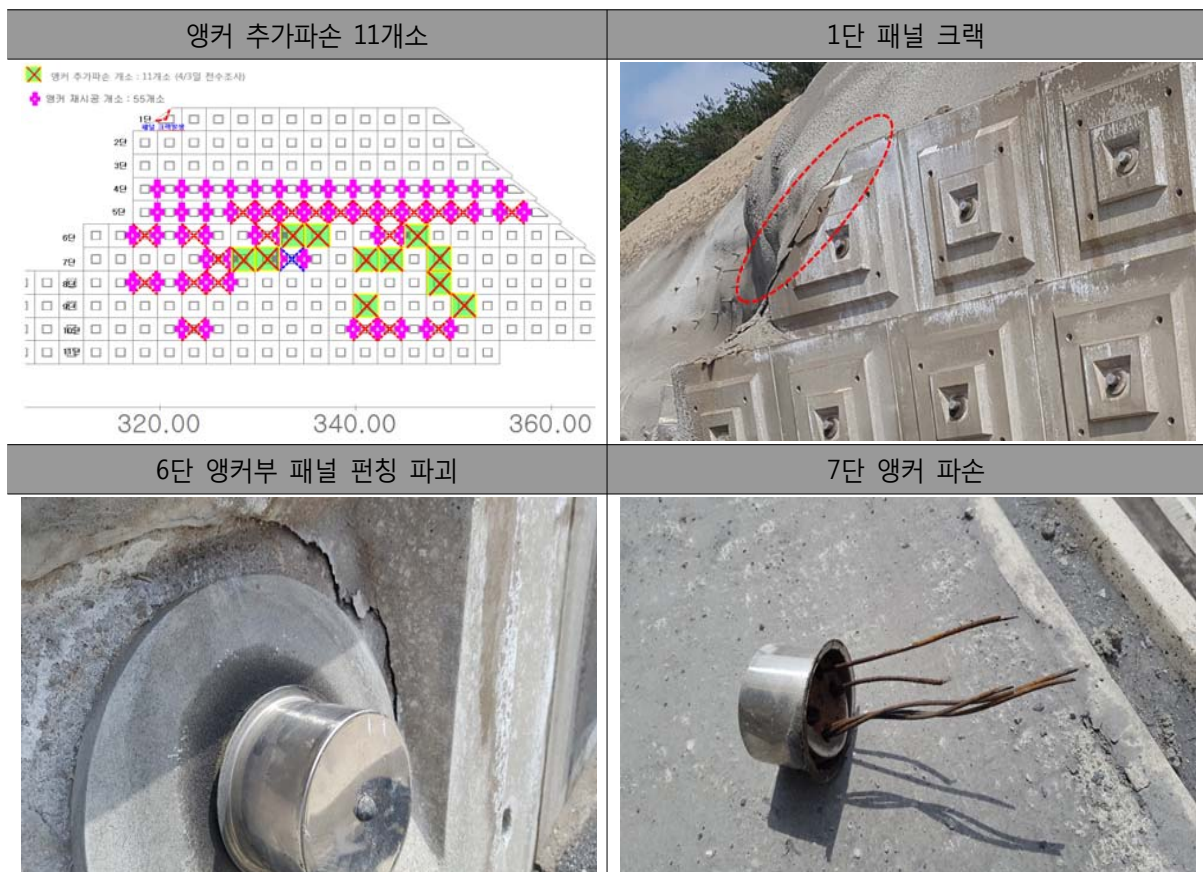


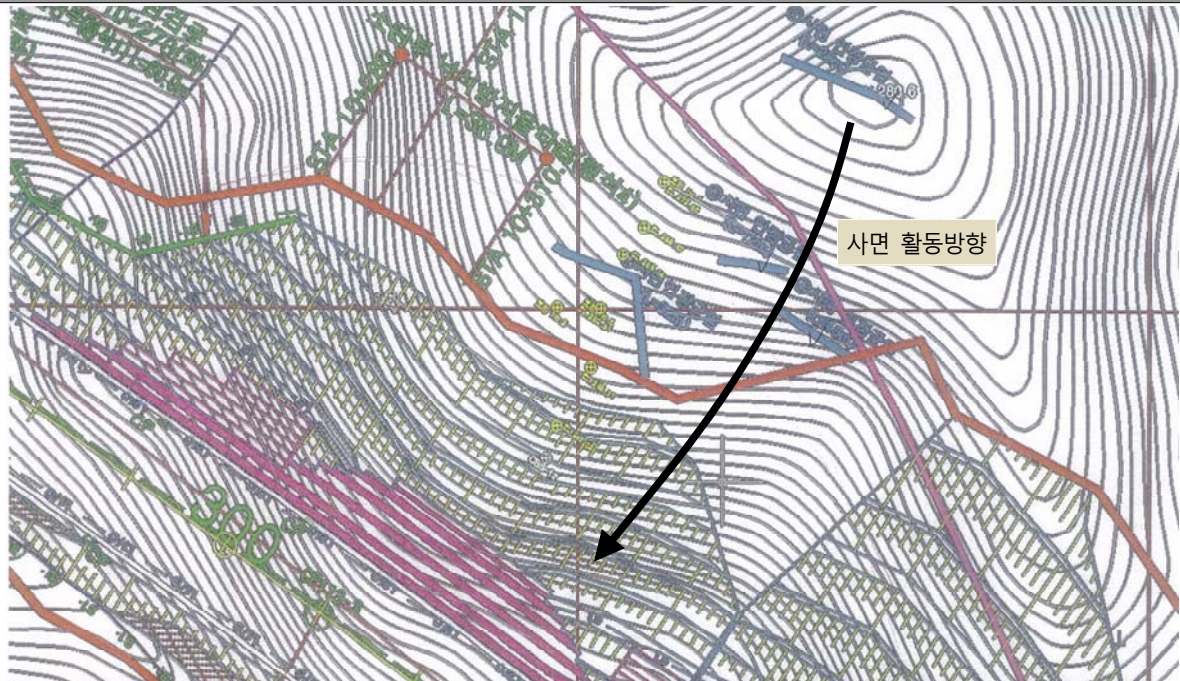
그림 5.1 절토부 앵커 추가파손 현황(2018년 4월)



그림 5.2 절토부 옹벽 상부콘크리트 상태(2018년 4월)

2018년 4월 12일 절토부 옹벽구간 상부 사면에 인장균열이 확인되었으며, 2017년 12월 5일 발생한 인장균열(①) 발생위치 뒤쪽에서 사면 정상부까지 총 3개소가 추가로 발생되었다. 관찰결과 균열길이는 12m~25m이고 활동이 사면 정상부에서부터 급경사면을 따라 절토부 옹벽 보강구간의 우측 방향으로 나타난다. 균열 발생 이력을 함께 도시한 그림 5.3에서 보면 2017년 11월에 발생한 균열의 위치보다 우측 상향으로 전파되는 양상을 보이고 있다. 또한 활동 양상이 사면 정상부까지 확대되어 균열이 발생한 것으로 보인다.

사면 인장균열 발생 위치



① 사면 인장균열 (L=32m)

② 사면 인장균열 (L=25m)



③ 사면 인장균열 (L=12m)

④ 사면 인장균열 (L=15m)



그림 5.3 사면 인장균열 발생 현황(2018년 4월)

5.2 계측결과 분석

절토부옹벽 구간의 사면 거동을 관찰하기 위해 설치된 광파측량 타겟은 총 21개소로 상주영천고속도로 개통 이후 10개소, 2017년 11월 이후 11개소 추가되어 현재까지 측정하고 있다. 2017년 12월 긴급보강을 수행하고 2017. 1.11~2018. 3. 8의 계측 자료로 기 분석된 내용은 보강공사 이후 측정된 수평변위가 3mm이하로서 안정적인 상태를 보여 추가 설치한 영구앵커의 지지효과에 의해 사면거동이 억제되는 것으로 평가되었다.

보강공사가 수행된 2017년 12월 이후 2018년 4월 12일 현재까지 절토부 옹벽구간에 수평변위는 4~9mm 정도로 측정되었고, 동 기간 수직변위는 1~7mm 정도로 나타났다. 주목할 만한 7~9mm 정도의 수평변위를 보이는 #1-6, 7 지점의 경우 PPP옹벽의 상부구간으로서 2017년 12월에 보강이 실시되지 않는 구간이며 수직변위 양상도 다른 지점에 비해 크게 나타나고 있다. 또한 8mm 정도의 수평변위를 보이는 #2-5 지점의 경우도 PPP옹벽 상단부인데 이 지점 상단부는 과거 정비시 완화되었고 기존 앵커의 이상이 발생하지 않았으므로 좌측부와는 독립적인 거동을 보이는 것으로 추정된다.

전반적으로 변위량 자체는 미소하나 추가보강 공사 후에도 보강이 이루어지지 않은 구간으로 PPP옹벽 상단부 부근에서 변위가 지속성을 갖고 있음을 알 수 있고, 이는 부분적인 보강보다는 전반적으로 활동면 후방에 정착부를 두어 폐합시키는 것이 필요하다는 것을 시사하고 있다.



그림 5.4 사면내 광파 타겟 계측 현황(2018년 4월)

앵커 두부에 설치된 5개소의 하중계 측정 자료에 의해 기 분석시 3월 7일까지 50일간 측정된 누적변화는 0.3~1.2ton이고 전회대비 0.1ton 이하로 변화량이 감소함으로써 안정을 유지하는 단계로 분석되었다. 그러나 2018년 3월 21일 측정 시 전회대비 1.0~2.4ton이 증가되어 토체의 활동 거동이 감지되었고 이후 불규칙한 하중증감을 나타내었다. 2018년 4월 3일 조사된 앵커 추가파손발생에 대응으로 추가천공 작업 중 앵커가 단선되어 6단 No.3 하중계 측정이 불가능해졌다. 하중 증가율은 2018년 1월 12일 초기치 측정값과 대비하여 4단부터 10단까지 5.2~10.0%로 웅벽 하단부로 갈수록 증가하는 경향을 나타내고 있다.

앵커 길이를 증가시켜 예상 활동면 후방에서 정착부를 형성시킨 2017년 12월 긴급보강 공사와 하중계에서 측정된 값의 변화를 보면 보강부 보다는 보강이 되지 않은 구간의 하중이 크게 변화하고 있고, 이는 앞의 광파타겟에서 측정되는 수평과 수직 변위의 양상과도 유사한 상태를 보인다. 긴급보강 후 사면 내에 내포한 불규칙한 불연속면의 거동이 보강공사 유무에 따라 억제 정도가 달라짐을 의미한다고 볼 수 있다.

● 하중계 설치 5개소

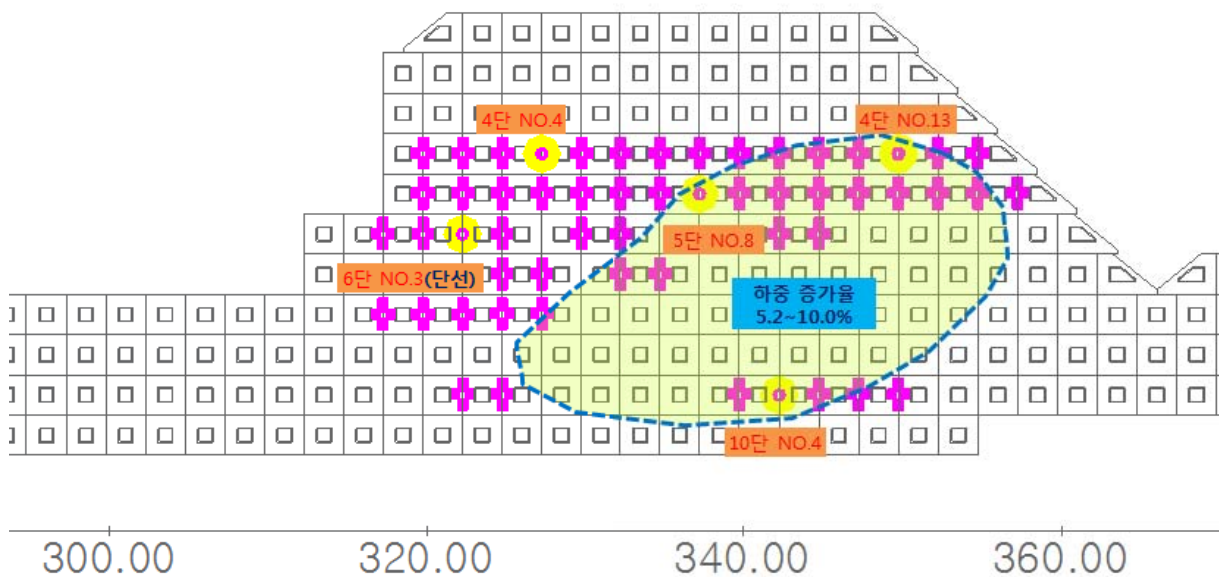


그림 5.5 사면내 하중계 계측 현황(2018년 4월)

사면에 발생한 균열 양상은 기존에 발생한 균열 위치보다 우상향 측에서 관찰되었다. 광파 타겟에서 측정된 수평과 수직변위 양상은 PPP옹벽 상단과 추가 보강공사가 시행되지 않은 우측구간에서 주목할 만한 변위량이 감지되었다. 앵커가 받는 축력 상황은 우측구간을 중심으로 단기간 내에 증가양상을 보였다.

이와 같은 거동은 지반조건상 점토층이 협재된 층리면이 연속성이 낮아 사면 억제력의 차이, 즉 활동면 후방에서 정착부가 형성된 2017년 12월 추가보강 공사의 유무에 따라 거동 양상이 지배받고 있음을 지시한다. 아울러 연속적인 층리면이 형성된 퇴적암반 사면 활동이 불안정성 출현시 단기간 내에 즉시 발생하는 것과는 달리 완속 활동을 보이고 있는 것은 사면 내부 층리면이 단속되어 있기 때문이라고 분석된다.

표 5.1 하중계 계측 자료(2018년 4월)

구분		4단 No.4	4단 No.13	5단 No.8	6단 No.3	10단 No.4	비고
1월17일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	42.6ton	40.1ton	1월12일 재인장 후 측정 실시 (초기치 값임)
	최초대비						
	전회대비						
1월24일	측정값	38.9ton	36.9ton	57.8ton	43.0ton	40.4ton	
	최초대비	0.2ton	0.3ton	0.4ton	0.4ton	0.3ton	
	전회대비	0.2ton	0.3ton	0.4ton	0.4ton	0.3ton	
1월31일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	42.9ton	40.0ton	
	최초대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.3ton	-0.1ton	
	전회대비	-0.2ton	-0.3ton	-0.4ton	-0.1ton	-0.4ton	
2월7일	측정값	38.7ton	36.6ton	57.4ton	43.0ton	40.0ton	
	최초대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.4ton	-0.1ton	
	전회대비	0.0ton	0.0ton	0.0ton	0.1ton	0.0ton	
2월21일	측정값	38.8ton	36.8ton	57.7ton	43.3ton	40.2ton	
	최초대비	0.1ton	0.2ton	0.3ton	0.7ton	0.1ton	
	전회대비	0.1ton	0.2ton	0.3ton	0.3ton	0.2ton	
2월28일	측정값	38.8ton	36.7ton	57.6ton	43.2ton	40.3ton	
	최초대비	0.1ton	0.1ton	0.2ton	0.6ton	0.2ton	
	전회대비	0.0ton	-0.1ton	-0.1ton	-0.1ton	0.1ton	
3월7일	측정값	39.0ton	36.9ton	58.0ton	43.8ton	40.6ton	2/28~3/7일 강수량 65mm
	최초대비	0.3ton	0.3ton	0.6ton	1.2ton	0.5ton	
	전회대비	0.2ton	0.2ton	0.4ton	0.6ton	0.3ton	
3월21일	측정값	40.0ton	37.9ton	60.4ton	45.2ton	42.6ton	3/7~3/21일 강수량 82mm
	최초대비	1.3ton	1.3ton	3.0ton	2.6ton	2.5ton	
	전회대비	1.0ton	1.0ton	2.4ton	1.4ton	2.0ton	
3월27일	측정값	40.1ton	37.8ton	60.4ton	45.7ton	43.0ton	
	최초대비	1.4ton	1.2ton	3.0ton	3.1ton	2.9ton	
	전회대비	0.1ton	-0.1ton	0.0ton	0.5ton	0.4ton	
4월12일	측정값	40.3ton	38.5ton	61.4ton	단선	44.1ton	추가전공 작업 중 단선되어 6단 No.3 측정불가
	최초대비	1.6ton	1.9ton	4.0ton		4.0ton	
	전회대비	0.2ton	0.7ton	1.0ton		1.1ton	

5.3 대안 분석

지반조건과 거동 관찰자료, 계측자료를 통해 부분적인 앵커보강 공사의 효과와 한계점을 파악하였다. 향후 안정성을 확보하기 위해서는 예상 활동면 후방에서 정착부를 형성시킨 2017년 12월 앵커 보강공사를 확대하여 전 사면에 걸쳐 동등한 억제력을 제공하는 것이 바람직하다. 또한 장기 안정성 측면에서 사면 상부의 하중을 경감시켜 안전율을 증가시키는 사면완화 공법을 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단한다.

추가적으로 발생 된 활동에 대하여 사면 하부 절토부 옹벽구간에 다음과 같이 앵커 67개소 재시공으로 보강방안을 수립하였다. 측정된 계측자료에 의하면 앵커에 발생하는 하중은 옹벽 하부로 내려갈수록 증가하는 양상을 나타내므로 집중되는 토압이 분산될 수 있도록 옹벽 상부 2단~3단과, 기존 재시공된 앵커 주변으로의 토압전이와 그에 따른 추가 파손을 방지하기 위하여 6단~9단 앵커 보강이 필요할 것으로 판단된다. 추가 보강되는 앵커는 2,3단과 6,7단에 연장 30m로 정착부가 활동면 외곽에서 마찰저항을 발휘할 수 있도록 하였다. 또한 파괴면의 선단부로 분석된 8단과 9단은 기존 보강되지 않은 부분에 대하여 연장 20m 앵커로 18개소 재시공을 계획하였다.

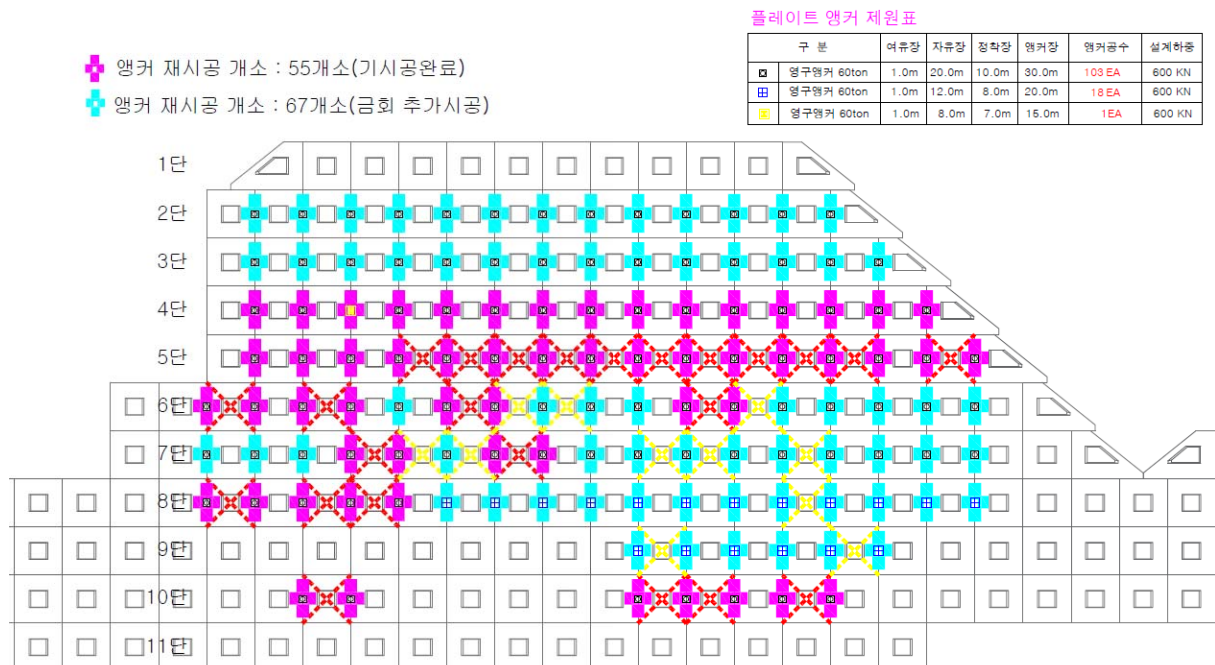


그림 5.6 절토부 옹벽구간 앵커 추가재시공 방안

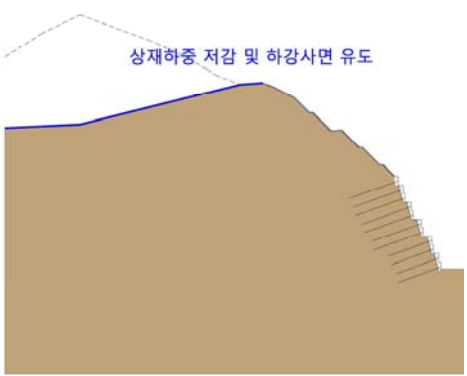
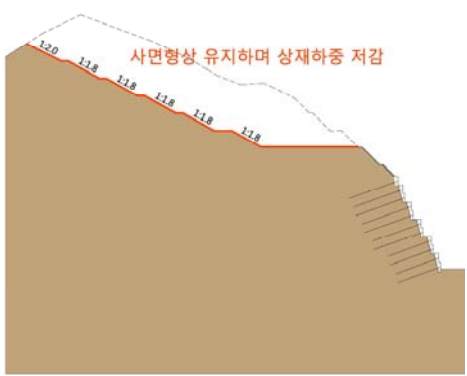
5.4 장기 안정성 확보 방안

사면의 안정성을 확보하는데 가장 효과적인 방법은 활동의 원인이 되는 사면의 규모를 완화시키는 것이다. 주변 여건상 제한이 있을 수 있으나 본 검토 현장과 같이 내재된 불연속면의 특성을 감안할 때 장기적인 측면에서 상부 사면을 제거하고 지형 특성상 후방이 하강 사면이므로 이를 확대함으로써 지표수 유입을 감소시킬 수 있다. 또한 사면 상부에서 발생한 균열부를 제거하여 활동 가능성을 대폭 줄일 수 있을 것으로 기대한다.

다음 표는 사면 완화와 지표수 처리, 이완 영역 제거의 측면에서 안을 비교한 것이다. 사면 활동 하중을 경감시키는 사면 완화는 공통적으로 적용하나 기존 사면 경사를 그대로 유지하는 2안과 후방으로 하향 경사를 형성하는 점이 다르다. 이미 사면에 불규칙하게 균열이 발생한 상태이므로 사면 완화로 인해 이완 영역의 상당부분이 제거될 것을 기대할 수 있다. 2안의 경우에는 보다 적극적으로 기존 네일링으로 보강된 부분까지 제거하여 보다 안정성을 높일 수 있다.

한편 1안의 경우에는 경사를 후방으로 유도함으로써 강우시 지표수가 사면으로 월류하는 것을 방지할 수 있는 장점이 있다. 미관찰된 내부 균열면이 있을 경우 지표수가 침투되어 수압을 증가시키는 것을 최소한으로 유도할 수 있는 장점이 있다. 평면상 적용범위는 균열이 발생한 끝에서부터 사면 정상부까지 시행하는 것이 바람직하다.

표 5.2 사면 장기안정성 확보 방안

구 분	1 안	2 안
적용 개념	사면 완화 배면 하향 경사	사면 완화 원사면 경사 유지 상부 이완영역 제거
개념도		
문제점 및 기대 효과	사면 활동력 감소로 안정성 제고 하향 경사로 강우시 수계 후방 유도 상부 네일링 구간 이완 영역 잔존	사면 활동력 감소로 안정성 제고 강우시 수계확대로 지표수 유입 증가 상부 이완 영역 제거 효과
추천안	◎	

6. 결론 및 추천사항

본 보고서에서는 상주영천고속도로 6공구 중 STA.10+260~10+460 상주방향(깎기 비탈면 7, 8)에서 발생한 사면활동의 원인을 추가지반조사를 통해 파악하고 안정을 확보할 수 있는 대책을 수립하였다. 이때 원설계자료, 실정보고 내용, 계측자료를 참고하였으며 그 결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) 점토가 협재된 세일과 사암층, 하부 탄질층으로 구성된 퇴적암 사면에서 소규모 단층에 의한 파쇄대와 점토충전층과 같은 불연속면을 따라 발생한 활동의 규모와 전단강도 특성을 규명하였다. 활동토체는 상부 균열면에서 하부 앵커 6~7단 부근을 통과하는 형태를 취하고 있으며, 불연속면에 내재된 점토 충전면을 따라 단속적인 계단식 원호 형태인 것으로 판단된다.
- (2) 활동이 발생한 주요 원인은 사면 내 불규칙하게 분포하는 점토 협재층과 파쇄대에서 활동이 발생되었다. 우상향으로 분포하고 있는 탄질층까지 영향을 받아 전체적인 활동이 야기된 것임을 알 수 있었다. 탄질층이 우상향으로 분포하고 있다는 관찰결과와 균열이 발생한 방향이 일치하고 있으므로 사면활동 방향은 사면에 직교하는 선에서 우측으로 10~20°정도 편향된 방향에서 거동하였을 것으로 추정된다.
- (3) 2017년 12월에 영구앵커를 추가로 시공한 긴급보강 공사로 인해 불안정한 사면이 안정을 회복하고 있음을 계측결과를 통해 확인할 수 있었으며 이때 시공된 앵커의 정착부는 활동면 외곽에서 마찰저항이 효과적으로 발휘되고 있는 것으로 평가된다.
- (4) 현재 계측 결과상에서 사면은 안정을 유지하고 있는 상태이나, 지표수 침투와 지하수 유동이 발생할 수 있는 해빙기와 집중 강우기를 지나면서 기존의 협재점토의 강도특성이 저하될 가능성이 잔존한다. 우기 이후까지 현재의 계측관리 체계를 유지하면서 거동 상태를 살펴볼 필요가 있다. 또한 사면 상부에서 발생했던 균열면을 따라 지표수가 추가로 유입되지 않도록 산마루 측구 등의 지표수 배제공을 즉시 적용하여 수압 증가요인을 없애는 것이 필수적이다.

- (5) 사면안정 해석결과에서 현재 보강상태는 기준 안전율인 1.5를 전후한 상태를 보이고 있으므로 점토 충전층의 거동을 상부로부터 조기에 제어하여 장기 안정 확보에 하는 것이 필요하다. 이를 위해 상부 토체를 제거하여 하중을 경감시키거나 보강공을 적용하여 안전율을 증가시킬 수 있는데 현재 고속도로가 공용중이므로 시공성을 고려하여 2017년 12월에 적용된 앵커공법을 2, 3단에 추가로 보강하는 것이 효과적이다.
- (6) 2018년 4월까지 파악된 거동 관찰자료와 계측자료를 토대로 지반조건과 연계하여 2017년 12월에 시행된 부분적인 앵커보강 공사의 효과와 한계점을 파악하였다. 향후 안정성을 확보하기 위해서는 예상 활동면 후방에서 정착부를 형성시킨 2017년 12월 앵커 보강공사를 확대하여 전 사면에 걸쳐 동등한 억제력을 제공하는 것이 바람직하다. 또한 장기 안정성 측면에서 사면 상부의 하중을 경감시키고 후방으로 사면 경사를 유도하여 수계를 축소 분리함으로써 안전율을 증가시키는 사면완화 공법을 적용하는 것이 효과적일 것으로 판단한다.